

DOI: 10.7652/xjtuxb201701014

仿生翼几何特征与气动性能的关系初探

李丹宇, 刘小民, 李典

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了揭示鸟类翅膀特征结构与其气动性能的关系,从而为高效低噪仿生翼型的设计和开发提供有益的基础信息和仿生学理论支撑,使用三维激光扫描仪对4种常见鸟类(红嘴相思鸟、黑尾蜡嘴雀、八哥、家鸽)进行实体扫描,将真实鸟翼进行数字化建模,构建了4种三维仿生翼模型,并截取得沿翼展方向不同截面位置处的仿生翼型。运用数值模拟方法对仿生翼的气动性能和噪声特性进行研究,并比较了不同攻角和不同雷诺数下4种仿生翼的气动性能。研究发现:4种仿生翼的气动性能曲线变化趋势一致,雷诺数对于4种仿生翼的影响效果也是相似的;当雷诺数大于100 000时,仿生翼气动性能的雷诺数效应并不明显;八哥仿生翼的气动性能良好,但适用的攻角范围较小;红嘴相思鸟仿生翼的升阻比相对较低,但对攻角的变化不敏感;擅长飞行的鸟类翅膀更明显地分化成两个部分,靠近翅根的部分整体弯曲,翼型不对称,靠近翅尖的部分基本平直,为对称翼型。噪声模拟结果还揭示了特定飞行状态下仿生鸟翼的气动噪声特性,可以推测,仿生翼的尾迹特征和飞行速度是影响其噪声分布情况的关键因素。

关键词: 仿生;翼型;升阻比;气动噪声;数值模拟

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0088-09

Study on the Relationship Between Geometric Features and Aerodynamic Performance of Bionic Wings

LI Danyu, LIU Xiaomin, LI Dian

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reveal the relationship between the special structures of birds' wings and their aerodynamic performances and hence provide useful information and support based on bionics theory for the design and development of high efficiency and low noise bionic airfoils, four kinds of birds (red billed Leiothrix, black tailed Grosbeak, starling, pigeon) as research objects were scanned using 3D laser scanner to reconstruct bionic wing models. Three-dimensional bionic airfoils from various sections of the birds' wings were obtained. Numerical simulation was conducted to investigate the aerodynamic performances and corresponding noise characteristics of the bionic wings. Firstly, through comparing the aerodynamic performances of the wings at varied attach angles and different Reynolds numbers, it was found that the performance curves of the four bionic wings change consistently, and are influenced by the Reynolds number in the similar way. When Reynolds number increases beyond 100 000, the performances of the bionic wings show little difference with the change of Reynolds number. The starling bionic wing

收稿日期: 2017-07-16。 作者简介: 李丹宇(1993—),女,本科生;刘小民(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676152)。

网络出版时间: 2016-10-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161021.1523.006.html>

performs better but only suitable for the case where the attack angle has little change. By contrast, the wing of red billed Leiothrix performs worse while its performance is not dependent on the angle of attack. Besides, the wings of good-at-flying birds can be divided into two parts: the root part of the wing is overall bending with asymmetrical airfoil; the top part is generally straight with symmetrical airfoil. The noise characteristics in certain cases were revealed according to the results of noise simulation. Also, the wake and flying speed can influence the distribution of noise.

Keywords: bionics; airfoil; lift-to-drag ratio; aerodynamic noise; numerical simulation

在自然界中,鸟类经过长时间的适应和进化,衍化出了针对不同飞行条件下的各种翅膀形态。借鉴和模仿鸟类的飞行特点和鸟翼的结构特征,是开发新型高级飞行器的一个重要思路。

在研究鸟类飞行能力方面,英国牛津大学的 Swaddle 等以欧洲八哥为研究对象,发现了鸟翼形状与鸟类的起飞能力和其飞行的敏捷程度有关^[1]。Wood 通过一系列的理论分析,提出了信天翁在动态飙升过程中的动力学特性和控制方程^[2]。美国蒙大拿大学飞行实验室的 Dial 和 Tobalske 等研究了蜂鸟悬停时向上扑翼和向下扑翼时的流场变化^[3]。Muijres 等对姬鹀飞行尾流进行研究,发现并比较了姬鹀上下扑翼过程鸟体周围流场的差异^[4]。美国 NASA 兰利研究中心也通过风洞实验对 4 种仿生翼的气动性能进行了研究和比较^[5]。Liu 等提取了海鸥、水鸭、长耳鸮、秋沙鸭等 4 种鸟类翼型,并发现海鸥翼型在各不同雷诺数下均有最大升力系数^[6]。在羽毛结构方面,Videler 指出羽毛有利于增强操纵性并延缓飞行失速^[7]。刘小民等对仿鸮翼的气动特性进行了研究,分析了两种仿鸮翼模型在气动性能和噪声分布上的差异^[8-9]。徐成宇等结合长耳鸮翅膀的非光滑结构建立了一种仿生耦合模型^[10]。丛茜等的研究表明,家燕翅膀且后掠形翅膀翼型的气动性能完全优于完全展开翅膀的翼型^[11]。雷富民等分析了纵纹腹小鸮生活习性和羽毛结构的关系^[12]。

本文以红嘴相思鸟、黑尾蜡嘴雀、八哥和家鸽等 4 种常见鸟类为研究对象,依据仿生学原理,建立了 4 种仿生翼模型。在此基础上,对 4 种仿生翼进行了数值模拟,并结合相应鸟类的飞行特点,分析了仿生翼几何构型、雷诺数和攻角大小对其气动性能和噪声特性的影响,从而为新型仿生翼型的发展和仿生飞行器的设计与优化提供重要参考和理论依据。

1 仿生翼模型建立及翼型提取

首先通过形态观测可以发现,红嘴相思鸟的翅

膀面积小、展弦比小且表面略有弧度,整体接近圆角矩形,前缘弧度非常平缓,末端轮廓圆滑,展开时整体向下微扣。翅膀的最大弦长分布在距离翅根约 40%处,此处也是初级飞羽和次级飞羽的交界处,结构简单,且前肢骨短,初级飞羽和次级飞羽分化不明显,羽毛排列较稀疏,羽边参差不齐。

黑尾蜡嘴雀翅膀的展弦比大于红嘴相思鸟,翅膀展开时整体呈直角梯形,前缘弧度在超过 1/3 处开始骤增,从 50%展长处到翅尖部分,即初级飞羽部分呈三角形,末端羽毛稍长,尾缘基本排列在一条线上。初级飞羽和次级飞羽分化明显,翅膀展开时初级飞羽基本没有弧度,而次级飞羽有一定弧度,向下微扣,幅度略大于红嘴相思鸟。羽毛排列整齐紧凑,羽毛搭叠时重叠面积较大,羽毛之间间隙较小。

八哥翅膀的展弦比与黑尾蜡嘴雀基本相同,翅膀整体呈橄榄状,翅根及翅尖方向弦长较小,翅膀中间部分弦长较大,最大弦长在距离翅根 30%左右处的截面。翅膀前缘弧度较大,尾缘也成弧线排列。翅膀展开时整体下扣,且凸起幅度较大。初级飞羽和次级飞羽在形状上的分化非常不明显。单片羽毛较宽,羽毛排列稀疏,羽毛之间缝隙较大,翅膀尾缘参差不齐。

家鸽翅膀相对前 3 种鸟翅膀较厚,尤其是翅根部分,厚实有力。翅膀面积很大,展弦比也很大,整体呈长条状。翅膀前缘基本呈一条直线,在翼角部分突起较明显。次级飞羽部分的尾缘基本成直线,在这一部分各截面弦长变化不明显;初级飞羽部分尾缘呈弧线状过渡到翼尖,使得这一部分翅膀呈三角形。家鸽翅膀展开时,除紧挨翅根处的区域外,基本没有下扣,上表面微微凸起,下表面基本是平坦的,整体呈平直的片状。家鸽翅膀羽毛形态分化较大,排列紧凑、整齐有规律,初级飞羽和次级飞羽有较大差异。此外,还可以清晰看出各级覆羽、小覆羽、肩羽等不同形态的羽毛,翅膀的整体结构较为复杂。

将自然死亡的鸟翼完全展开,固定为滑行时姿态,如图 1 所示,图中圆点为扫描过程中在鸟体翅膀表面黏贴的定位点,每次扫描至少需要确定 4 个定位点。使用 Handyscan 手持式三维激光扫描仪对鸟翼进行扫描,得到扫描片面(翅膀上下两个表面)。在 Geomagic Studio 中进行扫描片面的拼接和修整,得到相应的鸟翼模型,如图 2 所示。由于本文主要探讨仿生鸟翼的气动性能,而不是对鸟翼的表面纹理和某些特殊结构进行深入研究,因此在拼接扫描片面的时候尽量补齐鸟翼尾缘羽毛之间的间隙,修整片面边缘不齐整的部分,并且去除翅膀表面的一些细小纹理结构。



图 1 4 种鸟翼形态比较

以翅根处截面为参考截面,沿展向截取 0%、15%、30%、40%、50%、60%、75%、90% 和 97% 展长的截面,经光顺处理后,获得不同截面的翼型曲线,如图 3 所示。

从图 3a 可以看出,红嘴相思鸟的截面曲线整体

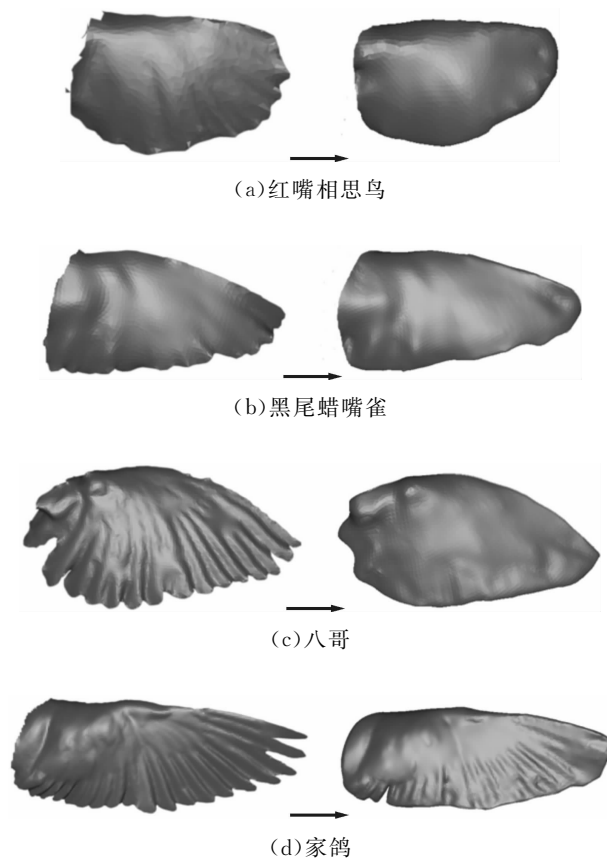


图 2 扫描片面(翅膀下表面)及相应的拼接获得的鸟翼模型

弯度均大于其余 3 种鸟类,从 30% 展长截面之后,翼型的变化很小,各截面曲线的大体形状基本相同,不存在形状突然变化的情况。这与真实鸟翼的初级飞羽和次级飞羽分化不明显的情况相符合。

如图 3b 所示,整体上来看,黑尾蜡嘴雀各个截面曲线可以分为两个部分:其一是从翅膀根部到 60% 展长处,这一部分的截面曲线均在尾缘部分和前缘部分向下弯曲,尤其是尾缘部分,向下弯折的程度更加明显;另外一部分是从 60% 展长处到翅尖部分,这一范围内的翼型较为平直,整体上几乎关于翼型弦长是对称的。这与真实鸟翼的初级飞羽和次级飞羽分化明显,且初级飞羽几乎平直、次级飞羽有明显弧度的情况相符。

从图 3c 可以看出,八哥的截面曲线在靠近翅根的部分,前缘非常宽大且较为平坦,其余部分较薄,整体弯曲弧度不明显,翼型沿展长方向逐渐过渡,形状没有发生突变。

由图 3d 可见,家鸽的截面曲线整体比较厚,可以明显看出沿展长方向能够分为两个部分:其一是从翅膀根部到 30% 展长处,这一部分对应的是次级飞羽部分,翼型有一定弧度;第二部分是从 30% 展

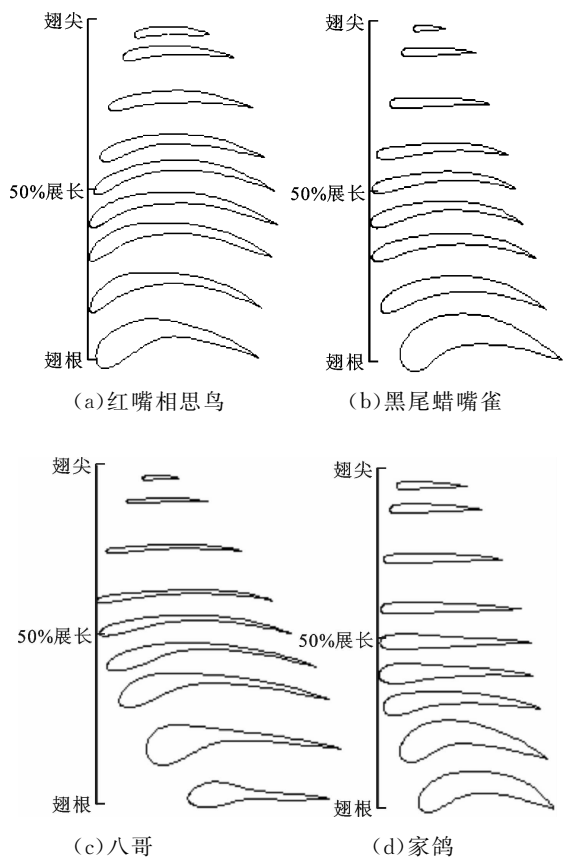


图 3 仿生翼不同截面曲线

长到翅尖部分,这一部分对应的是初级飞羽部分,翼型平直且相对于弦向是对称的,没有明显弧度。

从以上对扫描图的分析可以看出,4 种鸟翼结构在细节上还是有着较大的差异。通过在 Solid-works 中将截面曲线依次进行放样处理,最终完成三维实体仿生翼模型的重构。4 种鸟翼沿展向不同截面的翼型型线参数详见参考文献[13]。

2 数值模拟

为模拟真实鸟类的飞行条件,并尽可能地降低数值结果的湍流耗散,仿生翼下游方向取 20 倍弦长 c 距离,其余方向均取 10 倍弦长距离。计算域前半部分呈半圆柱体,后半部分呈长方体。

边界条件设置如下:设置计算域的上、下、前表面为速度进口边界条件,计算域后表面设置为压力出口边界条件。仿生翼表面设置为无滑移壁面边界条件,仿生翼根部的所在面设置为对称边界条件,靠近仿生翼翅尖的侧面设置为滑移壁面边界条件。具体如图 4 所示。

本文采用精度为 0.01 g 的盛博 LM-B 型电子秤对所研究的 4 种鸟类进行鸟体质量称量,红嘴相思鸟、黑尾蜡嘴鸟、八哥和家鸽的质量分别为 14.32、

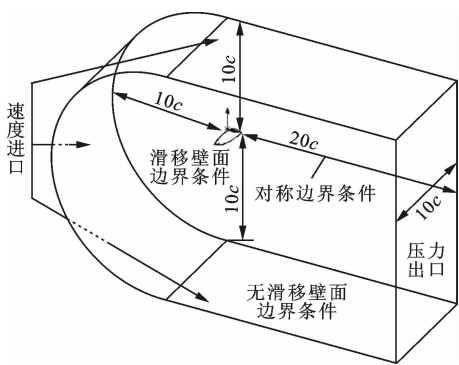


图 4 计算域示意图

30.63、130.92、403.51 g。在真实飞行情况下,红嘴相思鸟翅膀的平均弦长约为 50 mm、飞行速度为 7 m/s,对应雷诺数约为 20 000;黑尾蜡嘴雀鸟翼平均弦长约为 60 mm、飞行速度为 24 m/s,对应雷诺数约为 100 000;八哥鸟翼平均弦长约为 100 mm、飞行速度为 14 m/s,对应雷诺数也约为 100 000;家鸽鸟翼平均弦长约为 120 mm、飞行速度为 20 m/s,对应雷诺数约为 160 000。

在进行定常流动模拟时,为方便对比 4 种仿生翼的气动特性,对 4 种鸟类仿生翼模型进行了几何放大,选取仿生翼平均弦长为 1 m,计算在雷诺数为 20 000、100 000 和 160 000 时,不同攻角 $\alpha(-5^\circ \sim 25^\circ)$ 下仿生翼的升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 以及升阻比。湍流计算采用对近壁面流动具有较好模拟结果的 S-A 单方程模型。网格划分采用 ANSYS 中的 Meshing 模块,由于仿生翼模型呈不规则形状,故使用对复杂边界有较好适应性的非结构化网格进行模拟计算。对仿生翼近壁面进行网格加密处理,边界层加密层数设置为 10,网格生长率设置为 1.2,保证壁面法向到第一层网格 $y^+ \leq 1$,距离仿生翼较远位置处网格相对稀疏,以有效提高计算效率。以家鸽仿生翼模型为例的计算网格如图 5 所示,以正交性参数作为衡量网格质量的标准,网格最小正交品质数为 0.394,满足程序计算对网格质量的要求[14]。

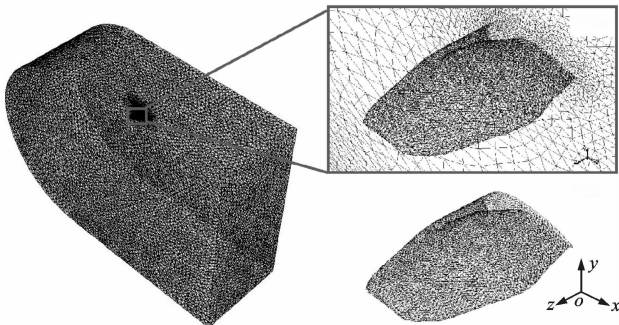


图 5 家鸽仿生翼模型计算域网格

为了验证所采用的数值计算方法和相应的数值计算模型的有效性,本文首先选择典型的 SA7035 非对称翼型作为计算对象,如图 6 所示。采用与仿生翼型数值模拟过程中相同的边界条件和数值计算方法设置,计算雷诺数为 20 000 时 SA7035 翼型的升力系数,并与风洞实验值^[15]进行对比。由图 7 可以看出,数值模拟结果与风洞实验结果吻合良好,保证了模拟结果的可靠性。

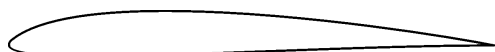


图 6 SA7035 翼型

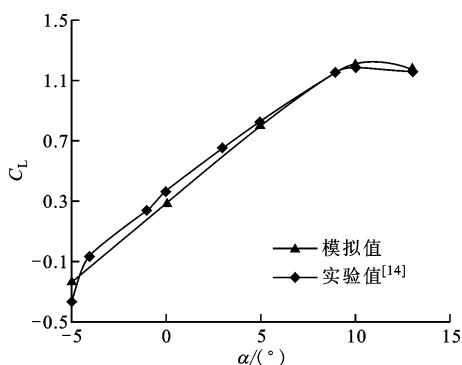


图 7 SA7035 翼型升力系数随攻角的变化

为了在保证计算精度的情况下最大限度地提高计算效率,同时进行网格无关性验证,本文以家鸽为对象,计算了攻角为 0° 、雷诺数为 100 000 时家鸽仿生翼升力大小随网格数的变化,如图 8 所示。从图中可以看出,在网格数为 130 万左右时,仿生翼的升力几乎不再发生变化,故本文在对不同鸟类仿生翼的气动性能的数值计算中采用的网格数均大于 130 万。

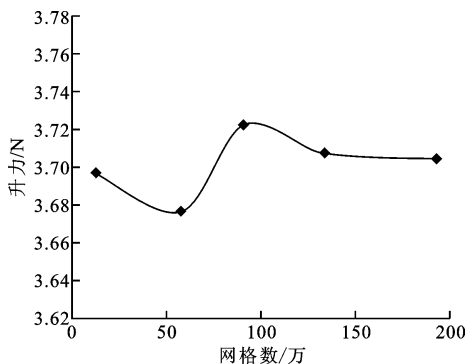


图 8 升力随网格数的变化

在非定常计算中,采用基于 Wall-Adapting Local Eddy(WALE)亚格子尺度模型的大涡模拟方法进行流场模拟,其中 WALE 模型的采用对近壁区的处理有着较强的自适应性。网格设置与划分以及边

界条件设置等与定常计算时保持一致。计算时间步长取为 10^{-5} s,为确保气流能流过仿生翼,计算时间步数设置为 5 000。使用大涡模拟进行非定常流动计算,监测仿生翼的升力系数变化。当升力系数不再随计算迭代次数发生变化时,即认为流场趋于稳定,此时在计算中引入 F-WH 方程,继续进行噪声的模拟计算。流场和声场控制方程及详细的数值计算方法参见文献[8]。图 9 所示为声场计算中声压接收器的布置,在 50%展长截面处放置接收器,接收器距离仿生翼中心位置 10 倍弦长,每隔 30° 放置一个,一周共放置 12 个。其中, 0° 方向为仿生翼下游方向, 90° 方向为仿生翼正上方。在进行仿生翼噪声计算时,设置 4 种仿生翼的攻角均为 5° 。

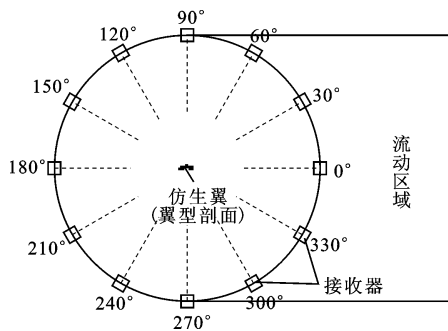


图 9 噪声接收器布置示意图

3 计算结果及分析

3.1 仿生翼气动性能计算结果及分析

4 种仿生翼模型的性能曲线变化特征十分相似,因此下文中均以家鸽仿生翼为例进行分析,如图 10 所示。升力系数随攻角的增大而增大,但是当攻角大于一定度数时,增加的趋势变缓,升力曲线逐渐变平。攻角为 0° 时阻力系数最小,当攻角小于 5° 时,阻力系数曲线比较平缓;当攻角大于 5° 时,阻力系数随着攻角的增大明显增大,且增大的速度越来越快。随着攻角的增大,升阻比先增大后减小。4 种仿生翼升阻比均在攻角为 5° 左右达到最大值。雷诺数对 4 种仿生翼的升力系数、阻力系数和升阻比随攻角变化曲线的影响效果是一致的。雷诺数为 160 000 和 100 000 时,仿生翼的升、阻力系数,升阻比曲线基本重合。这说明对于 4 种仿生翼来说,当雷诺数大于 100 000 时,它们的气动性能随雷诺数的增加变化微小,几乎可以忽略。雷诺数为 20 000 时的气动参数曲线与大于 100 000 时的情况有比较明显的差异,且 100 000 雷诺数下仿生翼气动性能更优。

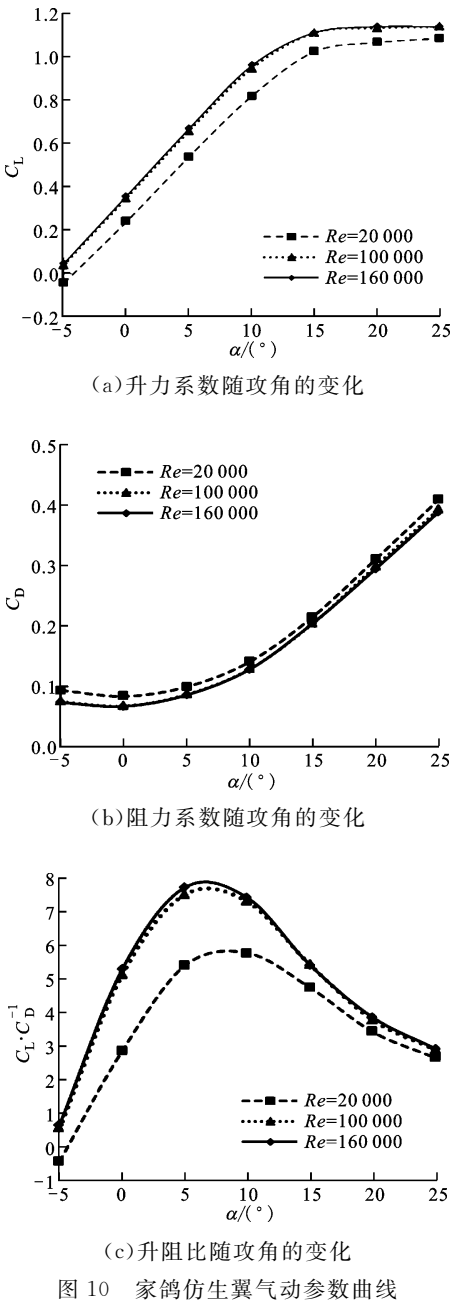


图 10 家鸽仿生翼气动参数曲线

4 种仿生翼的气动参数曲线虽然在趋势上保持一致,但仍存在一些差异。以雷诺数为 100 000 时 4 种仿生翼的气动特性为代表,分析 4 种仿生翼升阻比的差异,如图 11 所示。八哥仿生翼的升阻比曲线是最陡的,上升快,下降也快,在攻角不到 5°时就达到最大,其升阻比最大值能够达到 8.7,是这 4 种仿生翼中最大的。但是,在攻角很小和很大时,八哥仿生翼的升阻比是最小的。这种仿生翼在较小的攻角变化范围下性能较好,适应性差。相思鸟仿生翼的升阻比曲线是最平缓的,在攻角为 7°时达到最大,最大值为 5.9,是 4 种仿生翼中最小的。该仿生翼整体性能较差,但是对攻角的敏感度低,适用的攻角

范围宽。家鸽仿生翼和蜡嘴雀仿生翼的平缓程度处于中间水平,前者略陡于后者。家鸽仿生翼在攻角很大或很小时,升阻比小于蜡嘴雀仿生翼。家鸽仿生翼在攻角为 6°时有最大升阻比 7.7;蜡嘴雀仿生翼在攻角为 5°时有最大升阻比 7.6,与家鸽仿生翼所能达到的最大升阻比相近。这两种仿生翼的性能和特点处在另外两种仿生翼(红嘴相思鸟和八哥)之间。

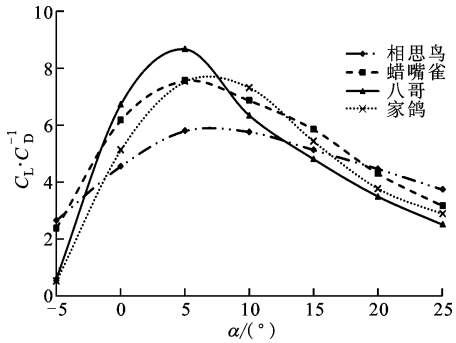


图 11 仿生翼在 $Re=100\,000$ 时升阻比与攻角的关系

4 种仿生翼在攻角为 5°、 $Re=100\,000$ 时,升阻比随位置的变化曲线如图 12 所示。由图可以看出:4 种仿生翼均在中部升阻比较大,在靠近翅根和翅尖的两端升阻比较小。这是因为翅根部分仿生翼最厚,且弯度很大,虽然升力很大,但是流动情况糟糕,在仿生翼下表面和尾缘部分会发生严重的流动分离,使升阻比较小;在翅尖部分,流动情况很好,不发生分离,但是升力也不大,因此翅中部分升阻比较大,为鸟类飞行的主要动力来源。

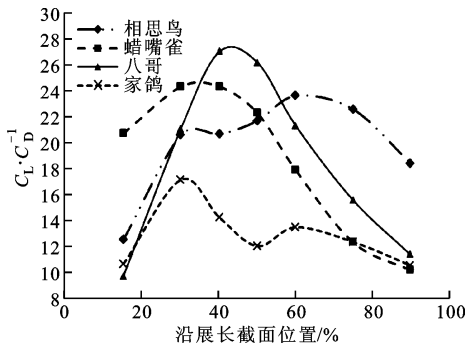


图 12 5°攻角、 $Re=100\,000$ 时不同翼型截面的升阻比

3.2 仿生翼噪声计算结果及分析

本文计算中仿生翼为唯一的噪声源。在噪声接收器处声压级的计算公式为

$$S = 20 \times \lg(p/p_r) \tag{1}$$

式中: p 为接收器处声压,由 Fluent 计算得到,然后根据式(1)计算获得接收器处的声压级大小; p_r 为参考声压值,本文取为 2×10^{-5} Pa。仿生翼的总声

压级由 12 个噪声接收器处声压级的算术平均值确定。

4 种仿生翼的噪声方向性分布如图 13 所示。整体上来看,4 种仿生翼 12 个监测点的平均气动噪声从大到小依次为黑尾蜡嘴雀(41 dB)、家鸽(40.4 dB)、八哥(36.8 dB)、红嘴相思鸟(21.3 dB)。这与它们的飞行速度具有一定的相关性,飞行速度越快的翅膀结构,整体噪声越大。

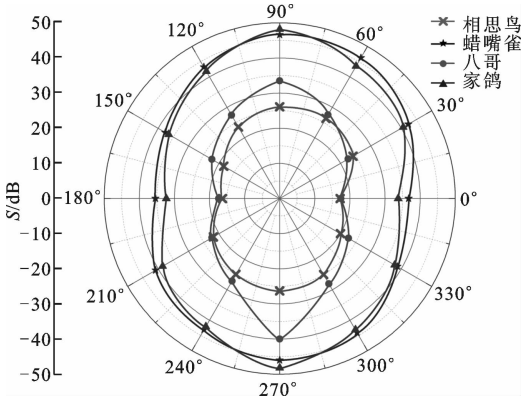
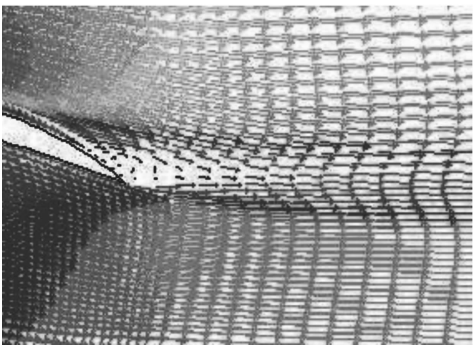


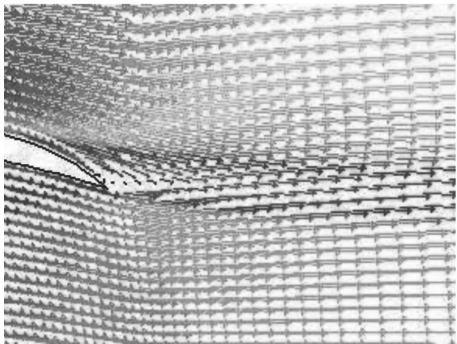
图 13 5°攻角时仿生翼噪声方向性分布

4 种仿生翼均在其上表面和下表面方向的噪声较大,在仿生翼的上下游方向噪声较小,整体分布表现出偶极子声源特性。红嘴相思鸟仿生翼和蜡嘴雀仿生翼上表面方向的噪声分布略向下游方向偏转,且前者偏转的幅度较大。八哥和家鸽仿生翼噪声分布左右对称,未发生明显偏转。结合定常计算获得的仿生翼尾部速度矢量图,分析认为,噪声分布的偏转可能与尾迹特征有关。如图 14 所示,在相思鸟仿生翼尾部明显有流动分离发生,在蜡嘴雀仿生翼上也能观察到较小的流动分离,而在家鸽和八哥仿生翼尾缘部分并没有观察到明显的流动分离。此外,蜡嘴雀仿生翼和家鸽仿生翼的噪声分布更均匀一些,即周围最大噪声与最小噪声的差值较小,噪声分布较为均匀。这可能与飞行速度有关,蜡嘴雀和家鸽仿生翼的速度较快,能够带动仿生翼周围流场掺混、混合,从而在一定程度上削弱了噪声传播的方向性。

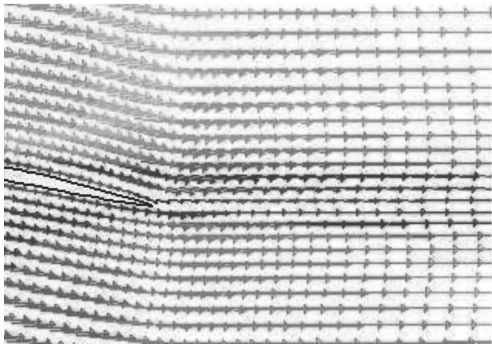
图 15a 为红嘴相思鸟仿生翼的 1/3 倍频程图,图中实线为 90°位置(仿生翼上方位置)处噪声的 1/3 倍频谱图;虚线为 0°位置(仿生翼下游位置)处噪声的 1/3 倍频谱图。在 0°位置处,噪声声压级量值全部为负。在 90°位置处,相思鸟仿生翼在 0.5~1.5 kHz 区域噪声较大,在 1 kHz 左右达到最大值;在 1.5 kHz 附近位置,噪声明显下降,而在 3 kHz 左右出现第 2 个峰值。可以看出,相思鸟仿生翼的



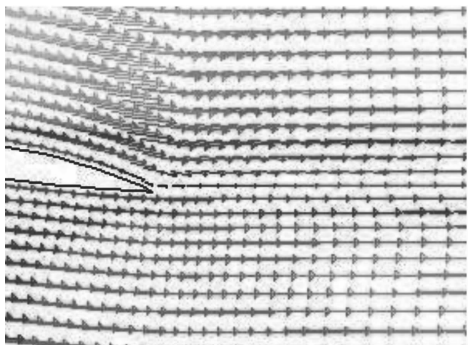
(a)红嘴相思鸟仿生翼



(b)黑尾蜡嘴雀仿生翼



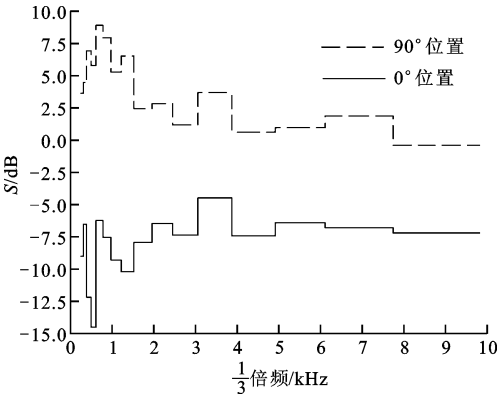
(c)八哥仿生翼



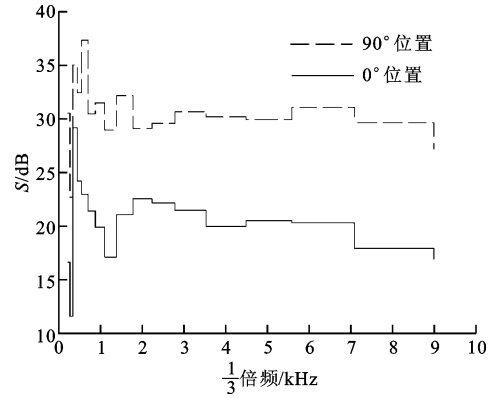
(d)家鸽仿生翼

图 14 30%展长截面不同鸟类仿生翼尾部速度分布

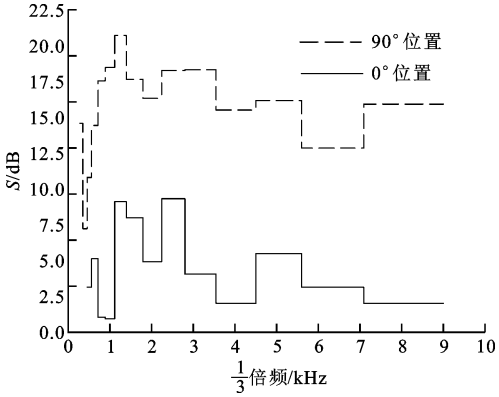
噪声整体上较小,这是因为红嘴相思鸟的飞行速度慢,仅 7 m/s,且鸟体娇小,在这种低速飞行的情况下,不易产生大的噪声。



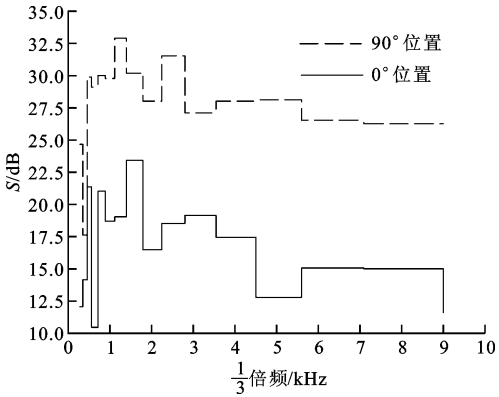
(a)相思鸟仿生翼



(b)蜡嘴雀仿生翼



(c)八哥仿生翼



(d)家鸽仿生翼

图 15 4 种仿生翼噪声 1/3 倍频程图

图 15b 为黑尾蜡嘴雀仿生翼的 1/3 倍频程图。因为黑尾蜡嘴雀飞行速度快,高达 24 m/s,故其总体噪声相对比较大。在 0°位置处的噪声在频率为 0.5 kHz 时最大,约为 28.5 dB,然后快速下降,在 1 kHz 降至 17 dB,在 2 kHz 时达到第 2 个峰值,升至 23 dB。在 90°位置处的噪声在 0.6 kHz 左右达到最大值 37.5 dB,然后下降,在 1.7 kHz 重新升高到 32 dB,为第 2 个峰值。

图 15c 为八哥仿生翼的 1/3 倍频程图。八哥仿生翼的噪声总体偏小,这与八哥飞行速度不快有关。在鸟类中,八哥不擅长飞行,飞行速度中等,约为 14 m/s。从图中可以看出,90°和 0°位置处的噪声频率分布走向基本一致,均在 1.3 kHz 和 2.5 kHz 各有一个峰值。90°位置处的噪声在 1.3 kHz 达到最大值,约为 21 dB,在 2.5 kHz 处达到第 2 个峰值,但是比第 1 个峰值小一些,为 18 dB 左右。0°位置处的噪声的两个峰值大小差别不明显,在 2.5 kHz 时达到的峰值稍大一些,为 9.5 dB,在 1.3 kHz 时的峰值为 9.0 dB。

家鸽飞行速度比较快,约为 20 m/s,因此家鸽仿生翼的总体噪声也比较大。图 15d 为家鸽仿生翼的 1/3 倍频程图,可以看出,0°位置处噪声在频率为 0.5、0.8 和 1.5 kHz 时各有一个明显的峰值,在 1.5 kHz 时的峰值为最大值,约为 23.5 dB;0.5 和 0.8 kHz 时的峰值大小差别不明显,均在 21.5 dB 左右。90°位置处噪声在 1.5 和 2.5 kHz 处各有一个明显的峰值,在 1.5 kHz 处的峰值更大一些,约为 33 dB,在 2.5 kHz 处的峰值为 31.5 dB。

4 结 论

(1)相对于其他 3 种鸟类,八哥仿生翼的升阻比最大,但是要保证良好的气动性能,攻角只能在很小的范围内波动;红嘴相思鸟仿生翼总体气动性能较差,但是对攻角变化的敏感度低。黑尾蜡嘴雀仿生翼和家鸽仿生翼的气动性能处于这两种仿生翼之间。在真实飞行情况下,蜡嘴雀和家鸽的飞行速度远大于相思鸟和八哥。由此可见,在仿生设计中,仿生原型的选择十分重要,在保证翼型优异气动性能的同时,也应关注到鸟类真实飞行的工况范围。

(2)家鸽和黑尾蜡嘴雀飞行速度较快,其翅膀明显分为两个部分,靠近翅根的部分对应次级飞羽,该部分翼型有一定弯曲程度,能够提供较大升力,这种分形结构有利于提高鸟类的飞行速度;靠近翅尖的部分对应初级飞羽,该部分翼型基本平直,不易产生

尾迹涡。不擅长飞行的红嘴相思鸟和八哥,翅膀翼型是渐变的,羽毛分化不明显。

(3)在大雷诺数条件下,4种仿生翼的气动性能均具有较为优异的气动性能。当雷诺数大于100 000时,4种仿生翼气动性能的雷诺数效应并不明显。

(4)尾迹特征和飞行速度会影响仿生翼噪声的方向性分布,尾迹可使仿生翼上表面的噪声分布向下游方向偏转,而速度飞行越快,仿生翼的气动噪声分布就更加均匀。

致谢 本文工作得到了西安交通大学能源与动力工程学院张楚华教授团队在实验仪器和测量方面的支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] MÖLLER A P, SWADDLE J P. Asymmetry, developmental stability and evolution [J]. *American Journal of Human Biology*, 1997, 12(5): 720-720.
- [2] ZSUZSA A, MATE N, TAMAS V. Comparing bird and human soaring strategies [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(11): 4139-4143.
- [3] WARRICK D R, TOBALSKE B W, POWERS D R. Lift production in the hovering hummingbird [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 2009, 276: 3747-3752.
- [4] 华欣. 海鸥翅翼气动性能研究及其在风力机仿生叶片设计中的应用 [D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [5] 傅一凡. 固定式机翼的仿生研究 [J]. *国际航空杂志*, 2007, 23(2): 23-24.
BO Yifan. Biologically inspired fixed-wing configuration study [J]. *International Aviation*, 2007, 23(2): 23-24.
- [6] LIU Tianshu, KUYKENDOLL K, RHEW R, et al. Avian wing geometry and kinematics [J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(5): 954-963.
- [7] GOTTFRIED S. Yaw stability in gliding birds [J]. *Journal of Ornithology*, 2005, 146(3): 191-199.
- [8] LI Dian, LIU Xiaomin. Aerodynamic performance and acoustic characteristics of bionic airfoil inspired by three-dimensional long-eared owl wing under low

Reynolds number [C] // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2016: V02AT41A006.

- [9] 李典, 刘小民, 杨罗娜. 仿鸮翼的三维仿生翼型叶片气动特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(9): 111-118.
LI Dian, LIU Xiaomin, YANG Luona. Aerodynamic characteristics of 3D bionic blade inspired by owl wing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(9): 111-118.
- [10] 徐成宇, 钱志辉, 刘庆萍, 等. 基于长耳鸮翼前缘的仿生耦合翼型气动性能 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2010, 28(1): 108-112.
XU Chengyu, QIAN Zhihui, LIU Qingping, et al. Aerodynamic performance of bionic coupled foils based on leading edge of long-eared owl wing [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 28(1): 108-112.
- [11] 丛茜, 刘玉荣, 马毅, 等. 家燕翅展翼型的气动特性 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(S2): 231-235.
CONG Qian, LIU Yurong, MA Yi, et al. Aerodynamics analysis of the airfoil when wings of swallow is gliding [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(S2): 231-235.
- [12] 雷富民. 纵纹腹小鸮的换羽研究 [J]. *动物学杂志*, 1994, 224(2): 35-39.
LEI Fumin. Research on moulting of the *Athene noctua* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1994, 224(2): 35-39.
- [13] 李典, 刘小民. 几种仿生翼型气动性能及噪声特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(12): 2629-2632.
LI Dian, LIU Xiaomin. Numerical study on aerodynamic performance and noise characteristic of several bionic airfoils [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(12): 2629-2632.
- [14] ANSYS Inc. ANSYS Fluent user's guide [M]. Canonsburg, USA: Ansys Inc., 2015: 704-705.
- [15] MICHAEL S S, JAMES J G, ANDY P B. Summary of low-speed airfoil data [M]. Virginia, USA: SoarTech Publications, 1995: 54-61.

(编辑 荆树蓉)