

Study on Mechanism of Silent Flight of Owls

Deyi Kong¹, Aiping Liang², Jinkui Chu³, Tao Mei⁴

¹Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui

²Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing

³Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

⁴China Security & Surveillance Technology, Inc., Shenzhen Guangdong

Email: kongdy@iim.ac.cn

Received: Nov. 5th, 2015; accepted: Nov. 19th, 2015; published: Nov. 24th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The silent flight of owls has long fascinated ornithologists, acoustic specialists, and even military experts; no other birds fly with such distinct advantages. In this work, the flight noise of a *bubo bubo* (a kind of large owl) was recorded, and followed by a comprehensive study on the mechanism of the silent flight, including research on the wing profile and its aerodynamic performance and acoustic property, the morphology of the feathers and its mechanical characteristics, as well as the microscopic structure of the skin and its sound absorption performance. It is concluded that the unique ability of silent flight of owls attributes to the combination of multiple noise reduction factors, sorted as sound suppression and sound absorption, which has piqued the interest of biomimetic research for noise control.

Keywords

Owl, Silent Flight, Biomimetic Noise Reduction

猫头鹰的静音飞行机理研究

孔德义¹, 梁爱萍², 褚金奎³, 梅涛⁴

¹中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥

²中国科学院动物研究所, 北京

³大连理工大学, 辽宁 大连

⁴中国安防技术有限公司中央研究院, 广东 深圳

Email: kongdy@iim.ac.cn

文章引用: 孔德义, 梁爱萍, 褚金奎, 梅涛. 猫头鹰的静音飞行机理研究[J]. 应用物理, 2015, 5(11): 137-146.

<http://dx.doi.org/10.12677/app.2015.511019>

收稿日期：2015年11月5日；录用日期：2015年11月19日；发布日期：2015年11月24日

摘要

猫头鹰在所有鸟类中飞行噪声最低，这一现象引起了鸟类学家、声学专家甚至军事专家的极大兴趣。本文首先测试了猫头鹰的飞行噪声特性，进而对猫头鹰翅膀翼型的宏观形态特征以及气动和声学特性，猫头鹰体表羽毛的微观结构特征和力学特性，猫头鹰体表皮和皮下结构的微观结构特征及其吸声特性开展了较为系统的研究，发现猫头鹰独特的静音飞行能力实际上是源于多个降噪因素综合产生的总体效应，是消声降噪和吸声降噪两种机制的共同作用，这对于研究减振降噪技术有着极为重要的启发意义和参考价值。

关键词

猫头鹰，静音飞行，仿生降噪

1. 引言

噪声是工业文明产生的第三大污染，其危害仅次于空气污染和水污染，减振降噪既是保护环境的迫切需要，也是节能降耗、提高工业产品质量所必须解决的问题。对于战机、军舰、潜艇等军事装备来说，过大的振动噪声不仅影响自身电子设备的正常工作，而且容易暴露目标，使其安全性受到威胁。在工业和民用领域，噪声问题已经成为全世界广泛关注的环境问题，已经严重影响到人们的日常工作和生活。比如噪声会直接导致人的听力受损，全球有1亿2千万人因噪声影响而听力下降；噪声也有害于人体心血管系统，噪音每上升一分贝，高血压发病率就增加3%；噪声还影响人体神经系统，巴黎和东京的自杀事件中有35%由噪音引起，英国每年死于噪音污染的人数已达6500人，美国有36.4%的人睡眠因噪声而受到影响，等等。因此，寻求更加有效的降噪方法以及新的降噪技术，一直就是一项十分重要的应用基础研究。

在所有鸟类中，夜行猫头鹰的飞行噪声最低，它在大自然中经过千万年的进化，已经形成了独特的躯体特征和能够适应环境的静音飞行本领，即使在万籁俱静的夜空背景声场下，猫头鹰高速飞行时的噪声也难以被其猎物察觉，因此，研究猫头鹰的静音飞行机理，对于研究减振降噪技术有着极为重要的启发作用和参考价值。

2. 猫头鹰的飞行噪声特性

要探究猫头鹰的静音飞行机理，首先必须了解其飞行噪声特性。调查发现，全世界猫头鹰共有200多种，在我国就有30多种，绝大多数种类的猫头鹰都是夜行者，即昼伏夜行，但也有少数种类的猫头鹰白天出来觅食。大量研究表明，夜行猫头鹰的总体飞行噪声水平在所有鸟类中最低，但也不是完全没有声音。我们对一种体型较大的夜行猫头鹰——雕鸮的飞行噪声频谱进行了测试，测试地点在合肥野生动物园内，同时还测试了另一种体型相当的猛禽——大鵟的飞行噪声频谱，并将两者进行了对比(图1)，可以看出，雕鸮的飞行噪声主要集中在1600 Hz以下频带内，即低频时其噪声特性并不理想，但在1600 Hz以上频率，雕鸮的飞行噪声强度大幅降低，而大鵟在整个测试频率范围内都有较高的噪声水平。由此推测，在千万年的进化过程中，猫头鹰巧妙地将绝大部分飞行噪声能量控制在1600 Hz以下的低频范围，而其猎物(田鼠等)的听觉只是对频率在2000 Hz以上的声音敏感，因此对于这些猎物来说，猫头鹰就是一

只无声的杀手。

3. 猫头鹰的羽毛形态特征及降噪机理

早在 1904 年，国外学者 Mascha 就发现了猫头鹰的静音飞行现象，并对此进行了研究，发现猫头鹰翅膀的初级飞羽外缘呈现梳齿状结构，并给出了这些梳齿的大致参考尺寸，如图 2 所示[1]。1934 年，另一学者 Graham 通过对比研究，认为夜行猫头鹰除了翅膀初级飞羽外缘有梳齿结构外，还有两个明显区别于其他鸟类羽毛的特征：翅膀初级飞羽后缘有穗状须边，腹部、腿部、颈部有大量松散柔软的绒毛。他认为这三个特征(图 3)是导致猫头鹰静音飞行的原因[2]。1998 年，英国声学专家 Lilley 通过理论计算，

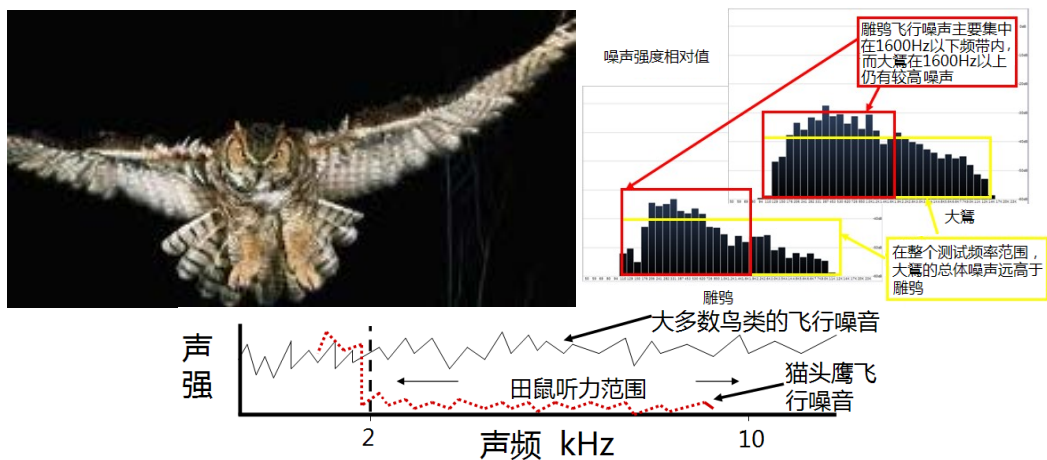


Figure 1. Flight noise spectrum of a *bubo bubo*

图 1. 猫头鹰飞行噪声频谱范围

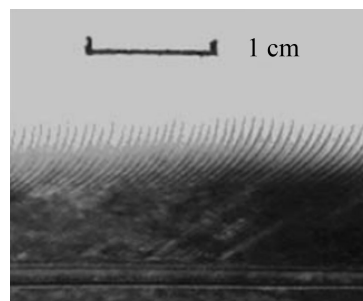


Figure 2. Flight noise spectrum of a *bubo bubo*

图 2. 猫头鹰飞行噪声频谱范围

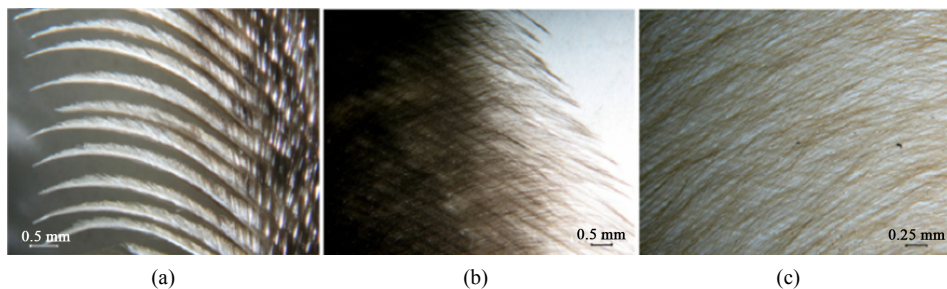


Figure 3. Three features of owl's feather: (a) Comb-like on the leading edge; (b) Fringe-like on the trailing edge; (c) Velvety covering on the most part of owls [2]

图 3. 猫头鹰羽毛三个特征：(a) 外缘梳齿；(b) 后缘须边；(c) 松软绒毛[2]

对这三个特征的各自降噪机理进行了解释：翅膀初级飞羽外缘的梳齿结构起到涡流发生器的作用，将流过翅膀表面的大空气涡流“过滤”成细碎的小涡流，抑制紊流边界层噪声的产生；气流经过翅膀后缘时会发生涡旋脱落分离，初级飞羽后缘的穗状须边可以使脱离过程变得离散，抑制涡流脱离引起的气动噪声；覆盖在猫头鹰体表的大量松软绒毛具有吸声降噪功能，能够吸收气流与猫头鹰身体作用时发出的声音，减少声音反射；这三种效果最终导致猫头鹰的飞行噪声在 2000 Hz 频率以上时很低[3]。这一结论得到众多后继研究者的支持[4]-[9]。此后，在猫头鹰的体表特征和降噪机理研究方面很少再有大的进展和突破。

上述由国外学者提出的猫头鹰体表三个特征主要是基于宏观尺度。在本文中，我们从微观学的角度，进一步研究了雕鸮翅膀羽毛的微细结构，并与苍鹰的羽毛进行了对比，发现两者都具有分叉结构，不过苍鹰羽毛只有三级分叉，而雕鸮羽毛则有四级分叉，分叉更多、程度更大，并且雕鸮羽毛后缘结构分散，呈线状，而苍鹰羽毛后缘几乎连在一起，呈波纹面，如图 4 所示。

此外，我们对大量分布在雕鸮腹部和腿部的绒毛微细结构进行了研究，发现雕鸮绒毛有三级分叉结构，其末级分叉为一种类似“竹节”的结构，不过其断面并非中空，而是实心结构，如图 5 所示。我们认为，猫头鹰体表羽毛的多级分叉结构(包括绒毛末级分叉“竹节”结构)在气动噪声能量耗散方面也发挥着重要作用，但对于此方面的研究工作，国内外均鲜有报道。

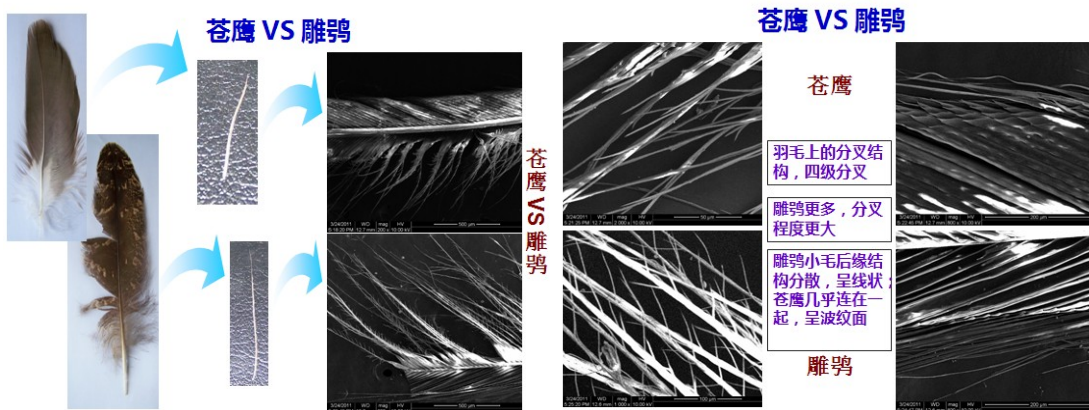


Figure 4. Branching of flight feathers between bubo bubo and goshawk
图 4. 苍鹰与雕鸮羽毛分叉对比

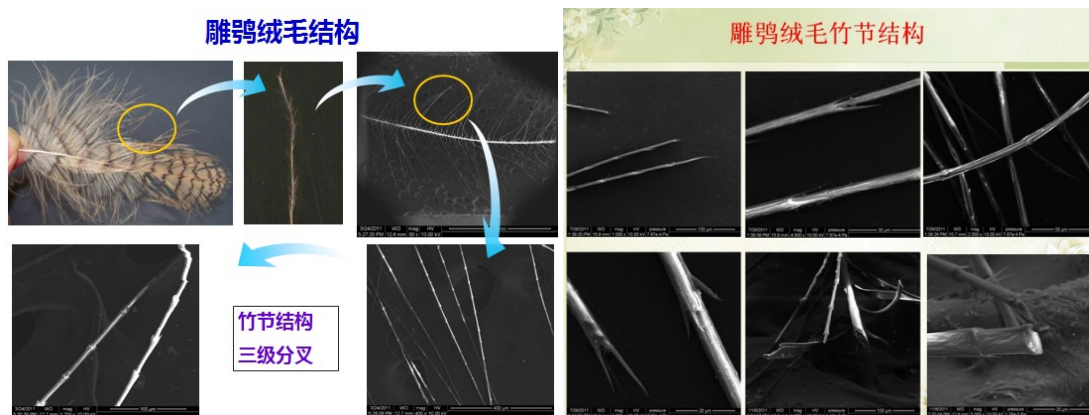


Figure 5. Bamboo joint structure of bubo bubo's fluff
图 5. 雕鸮体表绒毛竹节结构

4. 猫头鹰翅膀翼型特征及气动和声学特性

为了更加全面了解猫头鹰的体表特征与其静音飞行能力的关系，我们还对猫头鹰翅膀的整体翼型特征进行了研究。实验中我们选取了两只成年且体型大小相似的雕鸮和大鵟(鹰类的一种)，对其翅膀翼型进行对比分析。图 6 是采用三维激光扫描技术建立的雕鸮和大鵟翅膀的三维模型，发现两者有明显差异。图 7 是进一步得到的雕鸮和大鵟翅膀 1/2 处截面翼型的二维模型，模型宽度取 150 mm。计算机仿真结果如图 8 所示，在 10 m/s 风速下，雕鸮翼型的升力约为 0.896 (牛)，大鵟翼型的升力约为 0.809 (牛)，结果显示雕鸮翼型的升力效果好于大鵟翼型模型。此外，流场压力分布显示，在两种翼型尾部，雕鸮翼型尾部的压力脉动略小于大鵟翼型模型，表示它具有更好的声学特性。

此外，我们还发现，在猫头鹰翅膀前缘有凸起结构，如图 9 所示。为了研究该生物结构特征所起的作用，我们首先建立了仿雕鸮翅膀前缘凸起结构的三维仿真模型，以及没有该凸起结构特征的原型，并加工出这两种结构的三维实体模型，如图 10 所示。进而，我们在低速风洞中对这两种模型的气动特性进行了测试，如图 11 所示。

这两种模型气动特性的风洞测试结果及其对比如图 12 所示，左图是升力随攻角的变化情况，可以看出，有凸起结构的失速攻角增大，即具有更好的气动特性；右图是阻力随攻角的变化情况，从中发现，这两种模型的阻力相当，即有凸起结构并不会出现阻力增大的情况，表明该结构具有更好的气动特性。

这两种模型的噪声频谱测试结果及其对比如图 13 所示，相对气流速度是 30 m/s，从图中可以看出，在较宽的频率范围，有凸起结构模型的噪声有明显降低。

5. 猫头鹰羽毛的力学特性

我们首次对猫头鹰羽毛的力学参数进行了测试，以期探究其在与气流作用时是否会产生宏观的降噪效果。该项实验工作在大连理工大学完成[10]。实验中采用拉伸法分别测试了猫头鹰翅膀的初级飞羽、尾部羽毛和身体其他部位的绒毛，并计算得到这三种羽毛的弹性模量，发现翅膀和尾部羽毛的弹性模量较



Figure 6. The wing models of *bubo bubo* (left) and *buteo hemilasius* (right)
图 6. 雕鸮(左)和大鵟(右)翅膀的三维模型

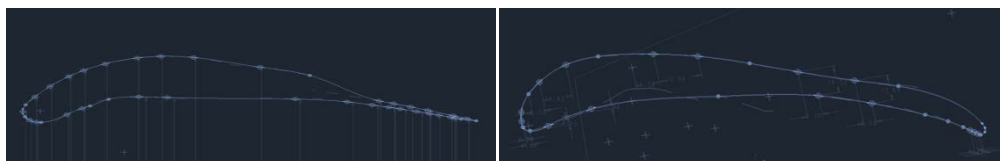


Figure 7. Cross section at 1/2 wing length of *bubo bubo* (left) and *buteo hemilasius* (right)
图 7. 雕鸮(左)和大鵟(右)翅膀 1/2 处截面翼型

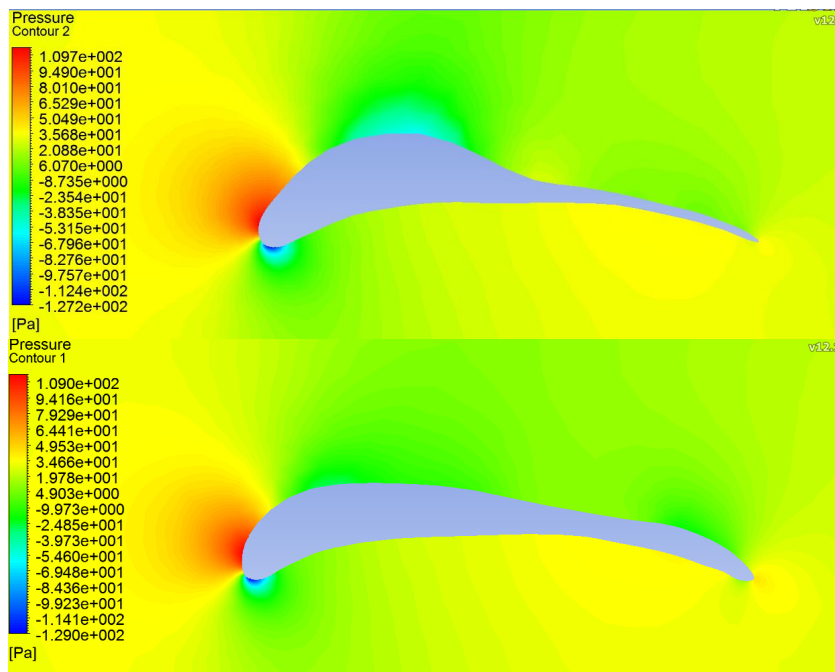


Figure 8. Simulation of wings' aerodynamic performance of bubo bubo (upper) and buteo hemilasius (lower)

图 8. 雕鸮(上图)和大鸮(下图)翅膀翼型的气动性能仿真

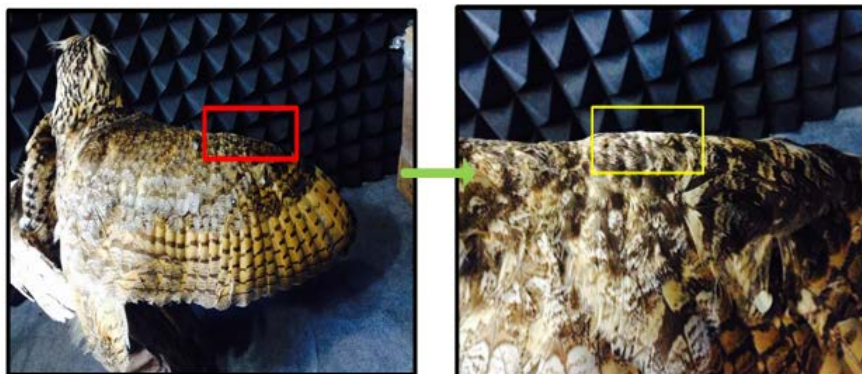


Figure 9. Raised outline on the front edge of bubo bubo wings

图 9. 雕鸮翅膀前缘凸起结构

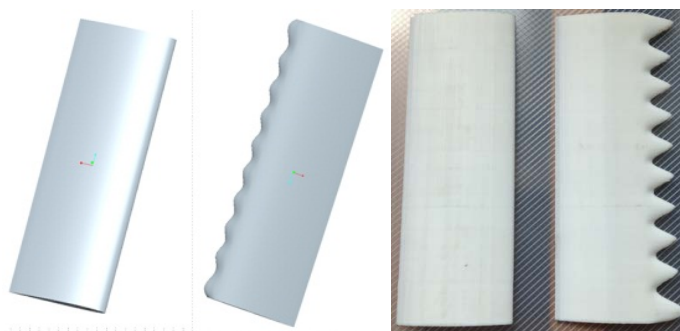


Figure 10. Models imitating the raised outline of bubo bubo wings (left: simulation model; right: fabricated model)

图 10. 仿雕鸮翅膀前缘凸起结构模型(左: 仿真图; 右: 实物图)



Figure 11. Experiments with the wing models in a low speed wind tunnel
图 11. 低速风洞测试实验

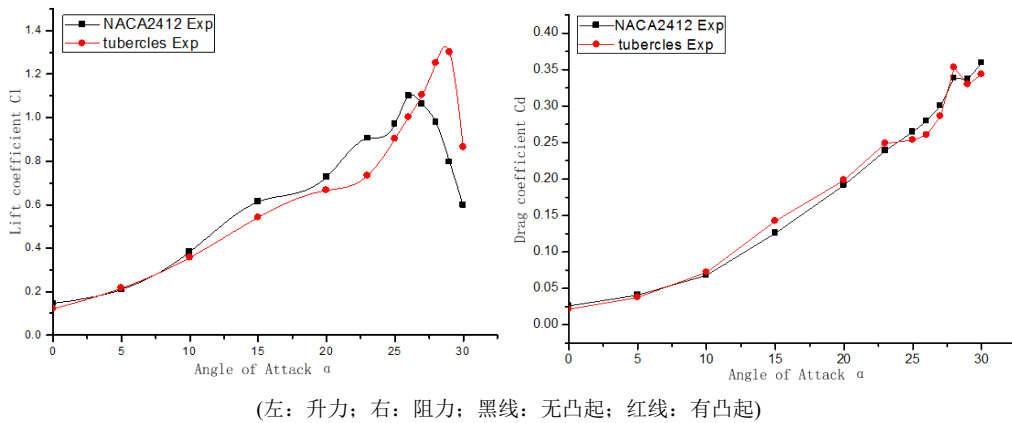


Figure 12. Experimental results of aerodynamic performance between the smooth outline model (black line) and the raised outline mode (red line), left: lifting force; right: drag force

图 12. 两种模型气动特性的风洞测试结果

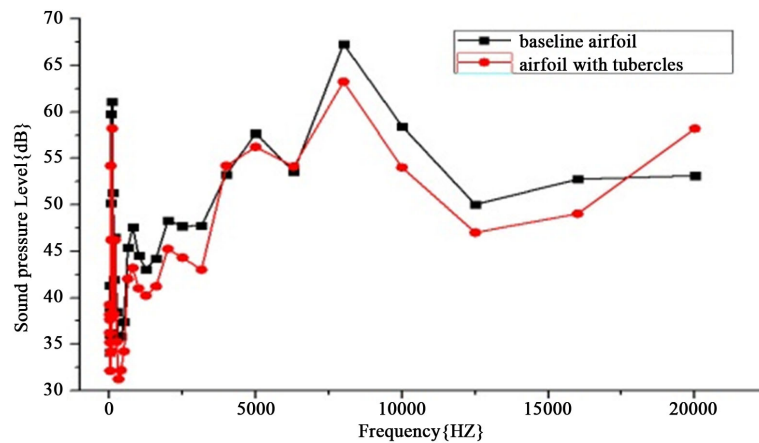


Figure 13. Measured noise spectrum of the two models at the air speed of 30 m/s

图 13. 两种模型的噪声频谱测试结果(30 m/s)

大, 在 3.13~3.66 GPa 之间, 绒毛的弹性模量较小, 在 1.47~2.04 GPa 范围。由此推测, 弹性模量较大的翅膀飞羽和尾部羽毛刚性较大, 不易变形, 因此主要用于调整和保持猫头鹰的飞行姿态, 获得最大升力, 而身体其他部位的绒毛因弹性模量较小, 较为柔软, 在飞行过程中受到气流冲击时, 通过柔顺变形来吸

收噪声能量。

6. 猫头鹰皮肤微观结构特征及其吸声特性

我们采用扫描电镜仔细观察了雕鸮的皮肤，发现雕鸮皮肤表面非常粗糙，凹凸不平，密布着大量的气泡状突起，最小的突起甚至不到 1 微米，如图 14 所示。这样的微观结构特征十分类似于多孔吸声材料，应具有一定的吸声降噪效果。

进而，我们采用微型 CT 设备对雕鸮皮肤进行了三维整体扫描和重构。图 15 是雕鸮皮肤的三维 CT 断面扫描照片，发现雕鸮皮肤上有大量毛孔，孔径数百微米不等，且分布不均。

此外，我们还对雕鸮腹部和大腿的皮肤及皮下组织进行了生理解剖实验，染色后进行了显微观测，并与鸭子的皮肤进行了对比，发现雕鸮腹部和大腿的皮肤及皮下组织有明显的分层结构，共分三层：表皮层、真皮层、皮下组织，且在真皮层与皮下组织层之间存在一个空腔结构，空腔高度 30~80 微米不等，而鸭子皮肤则无明显的分层现象，更不存在皮下空腔结构，如图 16 所示。这样的空腔结构应具有共振吸声的效果。吉林大学的科研人员在驻波管中测试了猫头鹰皮肤样本的吸声特性，并与山鸡、鸽子的皮肤样本进行了对比，发现在 2000 Hz 频率以上，猫头鹰皮肤样本的吸声系数明显要高出不少(图 17)，表明它具有更好的吸声性能[11]。

7. 猫头鹰降噪机理分析以及对仿生应用的启示

综上所述，我们认为，猫头鹰的静音飞行特性，实际上是多个降噪因素综合产生的总体效应，可以归结为两种降噪机制的共同作用，这两种降噪机制分别是消声降噪和吸声降噪，前者是通过抑制噪声的产生来降噪，后者则是通过吸收噪声来降噪。具体而言，猫头鹰的翅膀翼型和初级飞羽的形态结构发挥着消声降噪的作用，而大量分布在猫头鹰身体其他部位的绒毛的形态结构，以及猫头鹰皮肤和皮下结构，起到了吸声降噪的效果。至于猫头鹰羽毛的力学特性，对于降噪的贡献较为复杂，可能兼具消声降噪和吸声降噪的效果，还需进一步开展深入研究。

对于消声降噪的仿生思路，可借鉴猫头鹰翅膀翼型、初级飞羽前缘及后缘的大量特征，甚至羽毛的力学特性，研发新的飞行器关键部件材料及结构；对于吸声降噪的仿生思路，可借鉴猫头鹰皮肤粗糙多孔、皮下空腔的特征，研发由多孔吸声材料与共振吸声结构组成的复合吸声体，包括柔性吸声体。通过综合利用消声降噪和吸声降噪这两种机制，取得最佳降噪效果。

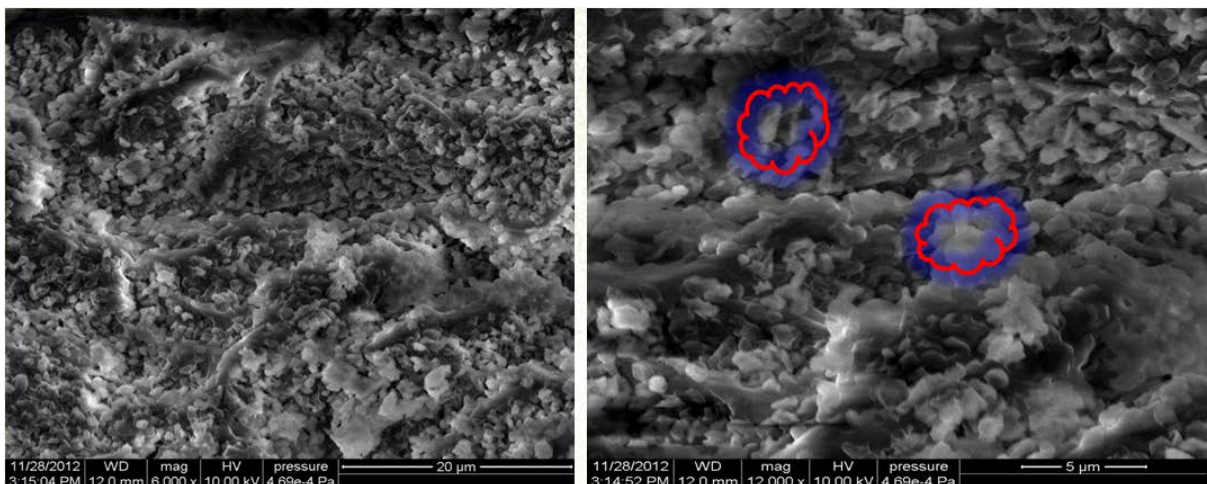


Figure 14. Microscopic structure of bubo bubo skin

图 14. 雕鸮皮肤微观结构特征

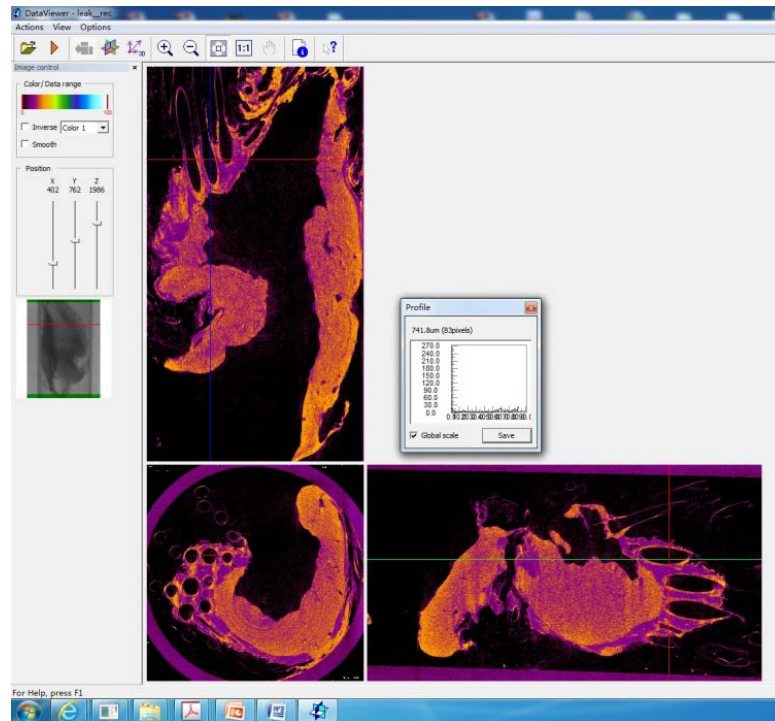


Figure 15. Three dimensional cross section of bubo bubo skin with CT
 图 15. 雕鸮皮肤的三维 CT 断面扫描照片

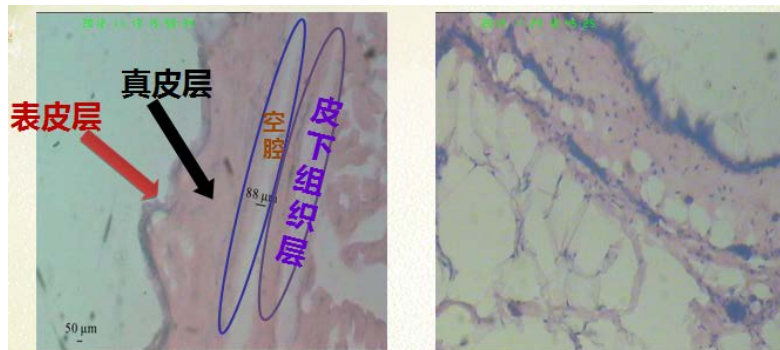


Figure 16. Difference of skin and subcutaneous structure between bubo bubo and duck
 图 16. 雕鸮和鸭子的皮肤及皮下组织结构对比

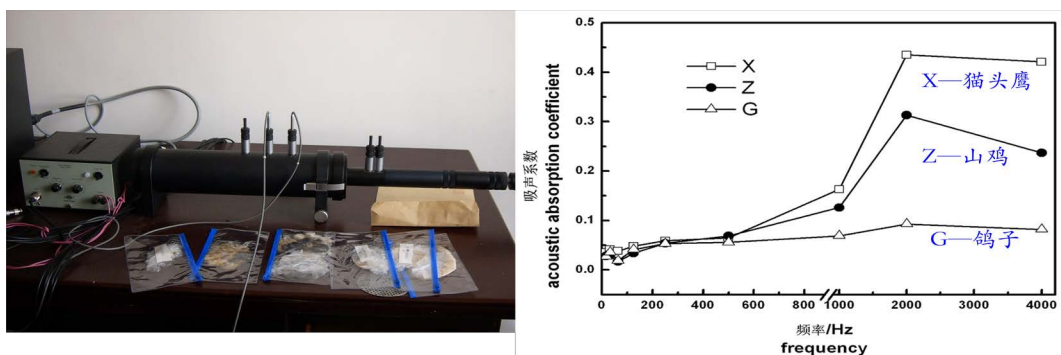


Figure 17. Sound absorption performance of owl skin sample in contrast to other birds [11]
 图 17. 猫头鹰皮肤样本的吸声特性测试结果[11]

8. 总结与展望

虽然国外对猫头鹰静音飞行机理的研究已有数十年,但主要还是停留在最初发现的猫头鹰三个体表特征以及对其降噪机理的解释方面,一直没有太大进展和突破。通过本文研究工作,我们认为,猫头鹰的静音飞行特性,实际上是多个降噪因素综合产生的总体效应,所以应从系统角度对其降噪机理进入全面深入研究,不能只是片面强调某一种因素的作用而忽略其他因素,这样才能为仿生学研究与应用提供更加客观准确的指导依据。

基金项目

本文研究工作得到国家 973 计划项目资助(2011CB302100)。

参考文献 (References)

- [1] Mascha, E. (1904) Über die Schwungfedern. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie*, **77**, 606-651.
- [2] Graham, R.R. (1934) The Silent Flight of Owls. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, **286**, 837-843.
- [3] Lilley, G. (1998) A Study of the Silent Flight of the Owl. *4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Toulouse, 2-4 June 1998, 1-6. <http://dx.doi.org/10.2514/6.1998-2340>
- [4] Bachmann, T., Mühlenbruch, G. and Wagner, H. (2011) The Barn Owl Wing: An Inspiration for Silent Flight in the Aviation Industry. *SPIE*, **7975**, 1-14.
- [5] Geyer, T., Sarradj, E. and Fritzsche, C. (2009) Silent Owl Flight: Experiments in the Aeroacoustic Wind Tunnel. *Jahrestagung für Akustik (DAGA 2009)*, 734-736.
- [6] Klän, S. (2011) Experimental Analysis of the Flow Over an Owl-Based Wing Geometry. *Berichte aus der Strömungstechnik*. Shaker Verlag GmbH.
- [7] Geyer, T., Sarradj, E. and Fritzsche, C. (2013) Silent Owl Flight: Comparative Acoustic Wind Tunnel Measurements on Prepared Wings. *Acta Acustica united with Acustica*, **99**, 139-153.
- [8] Jafar, M., Mustafa, S. and Thimantha, U. (2013) Experimental Study of Aerodynamic Noise from the Trailing Edge and Leading Edge of Blades in a Coaxial-Double Shaft Fan. *ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Incline Village, 7-11 July 2013, 1-7.
- [9] Justin, W. and Peake, N. (2013) Aerodynamic Noise from a Poroelastic Edge with Implications for the Silent Flight of Owls. *Journal of Fluid Mechanics*, **723**, 456-479. <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2013.139>
- [10] Gao, J. (2013) Structure and Mechanical Property of *Asio otus* Feather Barbs. *Key Engineering Materials*, **562-565**, 914-919. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.562-565.914>
- [11] 孙少明. 长耳鸮皮肤和覆羽耦合吸声降噪特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(3): 119-123.