

“蝴蝶声学蒙皮”——降低静音螺旋桨气动噪声的新方法

王磊

哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001, 中国

摘要: 进行了一项关于“蝴蝶声学皮肤”（鳞翅目昆虫鳞片覆盖物的金属版本）对双叶螺旋桨（直径 1200 毫米，翼型截面为 NACA 2415，转速为 1780 rpm， $Re \approx 2 \times 10^5$ ）在低速直通风洞中的声学性能的影响的实验研究。最初通过观察鳞翅目昆虫的多孔鳞片和鳞片覆盖物以及其他研究表明飞行鳞翅目昆虫的翼附器可以抑制噪音而将注意力吸引到这个问题上。蛾覆盖物的特性使这些昆虫能够在夜间抵御蝙蝠的袭击。这些附器非常小（尺寸：30–200 μm ）并具有各种多孔结构。我讨论了多孔鳞片的多种不同的微观和纳米结构，以及鳞翅目昆虫多孔鳞片覆盖物各种结构之间的许多细节差异。本文仅讨论蝴蝶 *Papilio nireus*、*Nieris rapae*、*Deelias nigrina*、雄蝶 *Callophrys rubi*、雄蝶 *Polyommatus daphnis*、蝴蝶 *Papilio palinurus* 的多孔鳞片以及菜蛾、大食蛾科蛾类和夜蛾科蛾类的多孔鳞片覆盖。本文简要讨论了鳞翅目昆虫的进化史和鳞翅目昆虫鳞片覆盖的特性，并介绍了降低飞机气动噪声的不同方法。带有中空区域的“蝴蝶声学皮肤”设计模仿了 *Papilio nireus* 蝴蝶的覆盖中空翼鳞。带有多孔区域的“蝴蝶声学皮肤”设计模仿了 *Pieris rapae* 蝴蝶的覆盖中空翼鳞，并模仿了 *Deelias nigrina* 蝴蝶的覆盖中空翼鳞。结果表明，空心壳旋转螺旋桨的总声压级比光滑壳螺旋桨低 2 dB 以上，而多孔空心壳旋转螺旋桨的总声压级比光滑壳螺旋桨低 4 dB 以上。研究发现，带有多孔区域的光滑“蝴蝶声学壳”对旋转螺旋桨声学效果的改变表现为吸声、湍流能量耗散以及对产生的噪声的降低。带有空心区域的光滑“蝴蝶声学壳”可以解释与螺旋桨降噪机制相同的原理。

关键词: 蝴蝶声学皮肤；飞蛾；降噪；多孔鳞片；螺旋桨

Butterfly Acoustical Skin, – New Method of Reducing Aero Acoustical Noise for a Quiet Propeller

Lei Wang

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: An experimental investigation was conducted on the effect ‘butterfly acoustical skin’ (metallic version of the lepidopterans scale coverage) on the acoustic performances of two - bladed propeller (diameter of 1200 mm, airfoil sections of NACA 2415, rotating speed of 1780 rpm, $Re \approx 2 \times 10^5$) in a low – speed straight through a wind tunnel. Attention was initially directed to this problem by observation of the porous scales and porous scale coverage of lepidopterans as well as other studies indicating the noise suppression of flying lepidopterans by wing appendages. The

Copyright © 2023 by author(s) and Upubscience Publisher.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution international License (CC By 4.0)

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



文章引用: 王磊. “蝴蝶声学蒙皮”——降低静音螺旋桨气动噪声的新方法[J]. 现代工程与应用, 2023, 1(1): 1-6.
DOI:

property of the moth coverage allows these insects to overcome bat attacks at night. These appendages are very small (size: 30 – 200 μm) and have a various porous structures. I discuss both many different micro – and nanostructures of the porous scales, and many differences in details among various structures of the porous scale coverage of lepidopterans. I consider here only porous scales of butterflies *Papilio nireus*, *Nieris rapae*, *Deelias nigrina*, male *Callophrys rubi*, male *Polyommatus daphnis*, butterfly *Papilio palinurus* as well as porous scale coverage of cabbage moth, moth of Saturniidae family and moth of Noctuoidea family. The evolutionary history of lepidopterans and the properties of lepidopterans scale coverage are briefly discussed as well as different methods of reducing aero acoustic noise of aircrafts. The design of ‘butterfly acoustical skin’ with a hollow region imitates the cover hollow wing scale of the *Papilio nireus* butterfly. The design of ‘butterfly acoustical skin’ with a porous region imitates the cover hollow wing scale of the *Pieris rapae* butterfly, and from the cover hollow wing scale of the *Delias nigrina* butterfly. Results indicate that the total sound pressure level of the rotating propeller with hollow skin is more than 2 dB lower with respect to the one with the smooth skin; and the total sound pressure level of the rotating propeller with the porous hollow skin is more than 4 dB lower with respect to the one with the smooth skin. The modification of acoustical effects on the rotating propeller with smooth ‘butterfly acoustical skin’ with a porous region was found to be to an acoustic absorption and to a dissipation of turbulent energy and to a reducing influence on noise generated. The same principles of the propeller noise reduction mechanism can explain by smooth ‘butterfly acoustical skin’ with a hollow region.

Keywords: Butterfly acoustical skin; Moth; Noise reduction; Porous scales; Propeller

仿生学，有时也称为仿生学，是将自然界中发现的生物过程和形态应用于工程系统研究设计 [1]。例如，大多数猫头鹰物种凭借其独特的翅膀可以在深夜接近猎物而不被发现 [2]。Graham 首次报道了猫头鹰的无声飞行，并描述了猫头鹰羽毛使其能够安静飞行的特殊适应性。他指出了猫头鹰羽毛使其能够安静飞行的三个特性：前缘的梳子、后缘的多孔边缘以及羽毛上柔软的表面。无声飞行的能力长期以来一直是寻找更安静飞行和流体机械解决方案的灵感源泉。一个多世纪以来，关于猫头鹰几乎无声飞行机制的研究仍然是理论和实验研究的一个有趣领域。许多此类机制已在技术翼型中进行了适用性测试，例如锯齿状或锯齿状后缘、梳状或刷状透气后缘或多孔翼型[3]。这些基础研究通常有助于设计新型轴流风扇以降低噪音排放、设计未来飞机和风力涡轮机叶片[4]。

蝙蝠和飞蛾之间的声学 战争已持续超过 6000 万年。蝙蝠和飞蛾之间的互动常被称为“军备竞赛”。飞蛾和蝙蝠（翼手目）在夜间活动。大多数蝴蝶和飞蛾的寿命只有几天，必须躲避捕食者并寻找食物和配偶。有些飞蛾利用这种方法（通过鳞片覆盖的多孔结构）来降低它们对声学定位蝙蝠的显眼程度。大多数翼手目昆虫依靠环境来确定方向，并在黑暗中利用声学定位捕获猎物。声学定位分为两种：被动声学定位，即探测被探测昆虫发出的声音或振动，然后进行分析以确定物体的位置；主动声学定位，即发出超声波产生回声，然后进行分析以确定猎物的大小、形状和质地[5]。

飞行昆虫的噪音和振动通常来自两个方面：翅膀的拍打和胸部的摆动。这两个方面的影响远远超过飞行昆虫的所有其他噪音源。I.S. Kovalev 首次观察到蛾类的鳞片可以降低飞行昆虫的噪音。他发现了蛾类鳞片覆盖的两个特性，这两个特性导致了其安静的飞行：翅附肢的多孔结构和蛾类身体覆盖的多孔结构。鳞片和鳞片将声能转化为热能。此外，I.S. Kovalev 和 A.K. Brodsky 的实验室实验表明，鳞片的存在可以最大限度地减少蝴蝶拍打时的振动。因此，大多数蛾类的拍打飞行是无声的，人类无法听到，更重要的是，它们的捕食者：蝙蝠和猫头鹰也听不到。换句话说，捕食者很难通过被动声学定位来探测飞蛾。

主动声学定位比被动声学定位有效得多。典型的调频蝙蝠会发出一系列非常短促的鸣叫。Roeder 首次观察到，蛾的鳞片覆盖会略微降低飞行中弯曲翅膀的蛾反射超声波信号的潜力。Kovalev 的研究、Ntelezos 等人的

研究、Zeng 等人的研究 以及 Shen 等人的研究 表明, 平板翅膀的覆盖比弯曲翅膀的覆盖吸收了更多的超声波信号有效能量。当超声波撞击蛾表面时, 蝙蝠的部分叫声会在鳞片覆盖中转化为热量, 或者通过翅膀几丁质的薄层进行转化, 因此蝙蝠很难通过主动声学定位检测物体(蛾)。这样, 飞蛾的覆盖特性使它们能够在夜间躲避捕食者的攻击。这些事实促成了本文的研究。

蝴蝶和飞蛾都属于鳞翅目昆虫。这些昆虫通常被称为鳞翅目昆虫。“鳞翅目”一词源于希腊语, 意为“鳞翅”。这些昆虫的翅膀表面覆盖着数百万个微小的可移动附肢——鳞片(大小为 30-200 微米)。这些附肢排列整齐, 就像屋顶上的石板瓦一样。鳞翅目昆虫翅膀的背面(也称为翅上面)和腹面(也称为翅下面)通常分别远端平铺有两种几丁质鳞片: 基鳞 Ba, 位于翅片正上方; 盖鳞 Co, 覆盖在翅片之上。

一、材料与实验方法

低速螺旋桨的气动声学特性在扎波罗热机械制造设计局(ZMBDB)的低速直通风洞中进行了测试。空气从高压储能器 HPS 通过阀门 Va 以低速进入宽阔的腔室 WC。金属丝网筛 S 有助于均衡腔室横截面上的速度。蜂窝状结构 H 确保通道内没有大规模的涡流, 并且空气沿通道直线流动。宽阔腔室的风的不规则性被巨大的空间所掩盖。因此, 当空气通过较窄的喷嘴 N(直径为 2000 毫米)时, 速度实现了均匀的增加。喷嘴的收缩段采用一对匹配的三次曲线进行设计。因此, 工作段内的气流均匀(自由流速度漂移小于约 0.9%)且呈层流(自由流湍流度小于自由流速度的 0.5%)。风洞内空气速度为 30 米/秒。基于弦长的典型雷诺数为 200000。

使用连接到 Datametric Barocel 电子压力计的皮托静压管测量测试段风。然后可以测量低至 0.0001 英寸水柱的压差。还使用恒温热线风速计测量了湍流速度数据和平均速度。空气温度保持在 20° C。

所有气动声学测试均在方形消声室(长 6 米、宽 4 米、高 3 米)内衬有吸声楔的两个叶片螺旋桨上进行。房间位于 ZMBDB 研究中心。消声楔的能量截止点在法向入射时的吸声系数大于 0.99。集热器位于测试段的下游。集热器表面附着吸音绒毛材料, 以降低开放式射流与集热器之间的相互作用噪声。在 30.0 m/s 的自由流速下, 背景噪声约为 34 dB。

噪声测量是在方形消声室中低速螺旋桨运转过程中进行的。声学仪器由 Brüel 和 Kjaer 公司生产, 包括一台集成 FFT 和 CPB 分析工具的 Pulse-X3570 声振分析仪、一台 Nexus 2690 放大器和 1 个 4939 型自由场 1/4 英寸传声器, 其动态范围为 28 Hz 至 164 kHz, 极化电压为 200 V。使用配备 1/4 英寸适配器 DP 0775 的 4228 型活塞式传声器, 将灵敏度校准至 250 Hz。窄带声压级谱采用 8192 点快速傅里叶变换计算, 频率分辨率为 0.2 Hz。声学仪器的采样频率范围为 0.026 Hz 至 28 Hz, 具体取决于待测最大频率和离散化线数。在这些测量中, 我采用了 0.026 - 0.25 Hz 范围内的分辨率, 这保证了声学离散音调的相当清晰的定义。记录了消声室内的温度和湿度, 以便计算大气吸收。声压级 (SPL) 频谱根据执行器响应自由场校正和大气吸收进行了校正。总声压级 (OSPL) 是通过对 SPL 频谱进行积分计算得出的。

先前的理论预测 和实验研究表明, 当观察者/麦克风从轴向位置移向旋转平面时, 螺旋桨噪声的谐波贡献变得更加明显, 而宽带项则减小, 最终谐波贡献在旋转平面附近占主导地位。根据这些结论, 麦克风被安装在消声室天花板上, 并位于两个平面的交汇处: 旋转平面和沿风洞纵轴的垂直平面。传感器放置在距螺旋桨旋转中心一个直径的气流之外, 麦克风位置位于湍流剪切层 TSL 之外。

螺旋桨由电动机 M 驱动, 电动机在 1780 转/分钟 (rpm) 的转速下提供 102 kW 的功率。电机吊架安装在空气动力学形状的支柱 SS 上, 该支柱通过嵌入其中的钢轨牢固地锚定在地板上(地板和支撑支柱随后用吸音泡沫覆盖)。电源由 240 V 三相电总线供电, 并由观察室控制。这使得实验者可以从相邻房间的一个位置操作数据采集软件和实验设备, 该房间设有指定的控制台。之所以选择电机控制器, 是因为其外部显示屏(显示电机

转速) 以及与外部电位器兼容, 用于精细调节电机的每分钟转数。为了将螺旋桨安装在电机轴上, 我们制作了一个铝制转接器, 以确保环境噪声 (包括电机本身的噪声) 不会过高。在自由流速为 30.0 米/秒时, 电机的总声压级为 39 分贝。仅使用自由电机进行了一组测量, 结果发现, 当转速超过 1780 转/分时, 背景噪声很小。

使用了三种不同的螺旋桨。第一个螺旋桨的外壳模仿了 *Papilio nireus* 蝴蝶的空心翼鳞。这种外壳被称为带有空心区域的光滑蝴蝶外壳 (SBSwHR), 其大小是实物的 400 倍 (厚度为 1.2 毫米)。SBSwHR 由两层组成。上部金属壁 UW (厚度为 0.5 毫米) 和下部金属壁 LW (厚度为 0.2 毫米) 由气腔 AC (净距为 0.5 毫米) 隔开。两层金属层通过垂直支撑 VS 连接。UW 的正面和反面都很光滑。外壁 (UW) 设有对角交错排列的圆形穿孔 (孔径为 0.5 毫米)。UW 的孔隙率为 40%。该金属壁由安德里茨菲德勒公司制造。下部金属壁 LW 类似于薄板。由于螺旋桨叶片形状非常复杂且各异, 叶片由 11 个蝶形蒙皮段组成: S1、S2、S3、……、S11。蝶形蒙皮段围绕叶片成型。最初, 每个段都由螺旋桨体支撑, 并固定在螺旋桨叶片光滑的外表面上。然后, 将这些段彼此非常靠近地放置。最后, 用胶泥 (GP) 覆盖每个对接接头 (AJ), 并形成齐平接头 (FJ)。SBSwHR 的结构设计类似于微穿孔板和被动孔隙度。

第二个螺旋桨的蒙皮模仿了菜粉蝶 (*Pieris rapae*) 的多孔翅鳞和黑地色蝶 (*Delias nigrina*) 的多孔翅鳞。这种蒙皮被称为带多孔区域的光滑蝴蝶蒙皮 (SBSwPR), 其尺寸是实物的 800 倍 (厚度为 1.2 毫米)。SBSwPR 由自由层组成。Pechan 和 Sencu 以及 Hamacawa 等人的实验研究表明, 螺旋桨叶片或翼型的各种表面缺陷 (凹槽、脊等) 都可能产生噪声。因此, UW 的正面和背面都是光滑的。SBSwPR 的上部金属壁 UW 在几何形状上与 SBSwHR 的 UW 相似。下部金属壁 LW 类似于薄板。

二、结果

本节介绍这三种螺旋桨的声学结果。讨论重点关注这些螺旋桨的叶片通过频率 (BPF) 音调。横轴上的频率范围为 0 至 3,800 Hz, 涵盖了总噪声的窄带和宽带部分。谐波部分显示在较低的频率范围内。音调噪声水平占总噪声的大部分, 而宽带噪声仅占一小部分。首先, 我研究了平滑旋转螺旋桨的声学特性。显示了转子平面内的近场窄带 SPS 频谱。在这个平面上, 基波带通滤波器 (BPF) 的 1 号音调及其最高至 6 号音调的高次谐波占主导地位。1 号音调的峰值比宽带噪声高 25 dB。旋转螺旋桨产生的 567 Hz 谐波音调, 高电平超过 65 dB, 从低频延伸至约 2,700 Hz。这些旋转螺旋桨音调始于 82.6 dB, 在 3,250 Hz 时下降至约 63 dB。

三、讨论

螺旋桨噪声的主要成分包括厚度噪声 (由于叶片的体积位移)、稳态载荷噪声 (由于叶片上施加的稳定力)、非稳态载荷噪声 (由于周向非均匀载荷)、四极子 (非线性) 噪声和宽带噪声。这些成分中的每一个都作用于叶片表面。

Sarradj E. 和 Geyer 展示了多孔翼型的降噪机理。我在 Sarradj 和 Geyer 的机理基础上, 发展了 SBSwPR 降低螺旋桨噪声的机理。采用 SBSwPR 的螺旋桨的噪声吸收主要体现在三个方面。首先是吸声。SBSwPR 的烧结粉末填料具有通孔和微通道, 使得声波能够轻松进入。当声音进入填料时, 由于声压的作用, 空气分子在相互连接的空隙中以发出声波的频率振动, 这些空隙将微粒隔开。这种振荡会导致摩擦损失。声波流动方向的改变, 加上流体在不规则孔隙中的膨胀和收缩现象, 会导致动量损失。在声音的激发下, 孔隙中的空气分子会周期性地压缩和松弛, 从而导致温度变化。由于粉末填料的长时间、大的表面积与体积比和高导热性, 热交换在低频下以等温方式进行。同时, 在高频区域, 压缩以绝热方式进行。在等温和绝热压缩之间的频率区域, 热交换会导致声能损失。因此, 声音通过吸声材料时声能损失的原因包括: 摩擦损失、动量损失和温度波动。另一个可能的方面是多孔表面会耗散边界层的湍流能量。这也会导致后缘产生的宽带噪声较少。第三个方面是降低

湍流与前缘接触产生的噪声以及其他产生噪声部件的影响。此外，微粒的散射也会影响粉末填料内部对声能的吸收。

众所周知，降低风扇噪声可以通过针对源头进行设计或结合声学处理来吸收源头产生的噪声来实现。从源头降低噪声的方法基于这样一个事实：任何显著的噪声产生机制都与作用于旋转风扇表面的非稳定周期性力有关，这些力是由阵风扰动引起的。这些非稳定力会引起声学扰动，这些扰动会通过风扇管道传播并辐射成噪声。该源头产生的噪声水平与脉动升力的大小成正比。因此，任何脉动力的降低都会导致噪声的降低。Tinetti A.F. 等人展示了通过在定子叶片上设置被动孔隙度来降低涡轮机械中相互作用噪声的机制。我基于 Tinetti 的机制，开发了通过 SBSwHR 降低螺旋桨噪声的机制。旋转的螺旋桨在 SBSwHR 多孔外表面上产生非稳态周期性力，从而产生声波辐射。声波在上壁(UW)上产生高压区+P 和低压区-P。存在压差的区域通过 UW 的多孔结构和气腔 AC 连接。因此，空气通过气腔从高压区+P 向低压区-P 流动。这样，两个区域之间的压差重新分布并减小。因此，螺旋桨的噪音降低了。

毫无疑问，大自然不像工程师那样是建造者。归根结底，大自然是无法模仿的。即便如此，工程师如果尝试观察一下蝴蝶尺度的生物结构，他很难找到解决自身技术问题的现成方案，但他或许会从中得到各种有趣的启发。

基于鳞翅目昆虫利用翼附肢的多孔结构和蛾体表皮的的多孔结构（这种结构经过数百万年的自然选择而进化）来降低噪音的方法，我提出了螺旋桨设计的未来，即采用不同的“蝴蝶声学蒙皮”来降低噪音，并提出了蒙皮的分类。

与鳞翅目昆虫的鳞片覆盖类似，“蝴蝶声学蒙皮”（BAS）可分为薄型（薄 BAS）和厚型（厚 BAS）。第一种“蝴蝶声学蒙皮”形成于螺旋桨叶片 PB 周围，并附着在螺旋桨外表面上。此外，与鳞翅目昆虫的鳞片覆盖类似，蝴蝶薄皮的结构可分为两类：一类是具有恒定净间距的气腔（SBSwHR）或 SPS（SBSwPR）

另一组气腔净距或蒙皮厚度 SPS 可变。第一组模拟蝴蝶鳞片覆盖；第二组模拟飞蛾鳞片覆盖。气腔高度从叶根 BR 到叶尖 BT 方向减小（ $hftr > hfft$, $hrtr > hrtr$, $hfbr > hfbr$, $hrbr > hrbr$ ），从前缘 LE 到后缘 TE 方向减小（ $hftr > hrtr$, $hfft > hrtr$, $hfbr > hrbr$, $hfbr > hrbr$ ）；附着在下叶片表面 LBS 上的鳞片覆盖净距大于附着在上叶片表面 UBS 上的鳞片覆盖净距（ $hfbr > hftr$, $hrbr > hrtr$, $hfbr > hfft$, $hrbr > hrtr$ ）。多孔材料的实验表明，与单孔材料相比，双孔材料可以实现更大的低频吸声效果。因此，UW（SBSwHR 的上金属壁）可以采用双孔结构：外壁的第一孔隙由成排的圆形穿孔形成，其次，UW 的孔隙由颗粒间的孔隙形成。

另一种螺旋桨降噪结构是“蝴蝶声学蒙皮”，它是一种腔室结构。该腔室结构由表面多孔层 (Lfp) 和内部共振腔 (IRC) 构成。Lfp 构成叶片上表面，Lfp 由 IRC 和实体隔板 (SP) 从内部支撑。与声线和软叶片类比，“蝴蝶声学皮肤”的腔体结构可分为两类：正交型和平行型。第一类的内腔或亥姆霍兹共振器垂直于弦轴 (CA)，第二类的内腔或亥姆霍兹共振器平行于弦轴。第一类腔体结构模仿了蛾子头顶附肢的排列；第二类腔体结构模仿了昆虫翅膀上蝴蝶鳞片的排列。

与菜蛾前翅鳞片覆盖的结构类比，“蝴蝶声学皮肤”的尖端段 (TS) 的结构设计可以呈现为薄型或厚 BAS 的平行拱形组；中间段 (MS) 的设计可以采用单层组、多层组或混合结构；根段 (RS) 的设计可以采用厚 BAS 的正拱组。

“蝴蝶声学蒙皮”将成为改善螺旋桨推进系统声学性能的一种非常有效的手段。带有 BAS 的螺旋桨叶片的更高声学性能可以提高飞行品质、安全性以及乘客和机场附近居民的舒适度。它可以降低军事行动中的可探测性（敌方被动声学系统很难探测到装有这种螺旋桨的飞机）。除了飞机外，蝴蝶声学蒙皮还可以用于喷气发

动机和潜艇。

四、结论

本文评估了“蝴蝶声学蒙皮”作为一种降低静音螺旋桨气动噪声的新方法的潜力。

由于民用和军用螺旋桨数量的增加以及随之而来的诸多操作问题，该课题尤为重要。推进系统的安静性和效率是先进飞行器设计的关键因素，往往决定着任务的成败。

最初，人们对这个问题的关注源于对鳞翅目昆虫多孔鳞片和鳞片覆盖层的观察，以及其他一些研究表明，飞行中的鳞翅目昆虫的翼附肢可以抑制噪声；飞蛾覆盖层的特性使这些昆虫能够在夜间躲避蝙蝠的袭击。这些翼附肢非常小（尺寸：30 - 200 μm ），并且具有多种多孔结构。本文讨论了多孔鳞片的多种不同微观和纳米结构，以及鳞翅目昆虫多孔鳞片覆盖层不同结构之间的许多细节差异。这里仅考虑了蝴蝶 *Papilio nireus*、*Nieris rapae*、*Deelias nigrina*、雄蝶 *Callophrys rubi*、雄蝶 *Polyommatus daphnis*、蝴蝶 *Papilio palinurus* 的多孔鳞片以及菜蛾、大食蛾科蛾类和夜蛾科蛾类的多孔鳞片覆盖层。简要介绍了鳞翅目昆虫的进化史和鳞翅目昆虫鳞片覆盖层的特性。讨论了降低飞机气动噪声的不同方法。

带有中空区域的“蝴蝶声学皮肤”设计模仿了 *Papilio nireus* 蝴蝶的覆盖中空翼鳞。带有多孔区域的“蝴蝶声学皮肤”设计模仿了 *Pieris rapae* 蝴蝶的覆盖中空翼鳞，并模仿了 *Delicias nigrina* 蝴蝶的覆盖中空翼鳞。研究结果阐明了“蝴蝶声学蒙皮”结构对双叶螺旋桨声学性能的影响。研究表明，当雷诺数为 200000 时，带有多孔区域的光滑“蝴蝶声学蒙皮”可使旋转螺旋桨的噪声降低 4dB，而带有空心区域的光滑“蝴蝶声学蒙皮”可使螺旋桨的噪声降低 2dB。采用“蝴蝶声学蒙皮”对旋转螺旋桨声学效果的改善是由于声学吸收、湍流能量耗散、对产生的噪声影响的降低以及压差的降低。

基于鳞翅目昆虫通过翅附肢的多孔结构和蛾体覆盖的多孔结构（这两种结构经过数百万年的自然选择而进化）来降低噪声的方法，我展示了未来“蝴蝶声学蒙皮”的不同设计，类比鳞翅目昆虫的鳞片结构和鳞片覆盖。定性研究已确定“蝴蝶声学蒙皮”会影响双叶螺旋桨的声学性能。其他关于“蝴蝶声学蒙皮”的研究表明，蒙皮可以增加升力并降低机翼振动。本实验不涉及蝴蝶声学蒙皮对螺旋桨振动和气动性能影响的实验研究。在不同风速和叶片转速下的完整解释尚待更详细的研究。但提出一些优化蝴蝶声学蒙皮几何形状及其结构的可能性，以进一步增强推力并降低螺旋桨的噪音和振动，似乎并非不合理。

参考文献

- [1] Benyus J M. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: William Morrow, 1997: 320.
- [2] Mascha E U. Zeitschrift fur wissenschaftliche Zoologie. 1903, 77: 606-551.
- [3] Sarraj E A. Fast Signal Subspace Approach for the Determination of Absolute Levels from Phased Microphone Array Measurements. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329: 1553-1569.
- [4] Graham R R. The Silent Flight of Owls. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1934, 286: 837-843.
- [5] Howe M. Aerodynamic noise of a serrated trailing edge. Journal of Fluids and Structures, 1991, 5: 33-45.