



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

基于仿生原理的扑翼机

2014 年 2 月 19 日

摘要

模拟鸟类飞行是人类长久以来的梦想，鸟类的飞行技巧比现有的固定翼飞机要轻巧和高效许多，基于仿生学原理的扑翼机和常规飞机相比，仅用一套扑翼系统就既可代替螺旋桨或着喷气式发动机提供推力，又可以起到升力面和控制面的作用，因而有潜力简化结构并降低飞机重量。从现有对于鸟类和昆虫的研究资料表明，扑翼飞行低速飞行时所需要的功率和普通飞机相比要小得多，并具有优异的垂直或短距起落能力。未来国内将要开放低空领域，这对于在通用航空而言，是个难得的发展机遇。

本文针对多自由度扑翼微型飞行器的相关设计问题进行了研究。主要研究内容包括：首先，从昆虫和鸟类翅膀构造出发，分析两类飞行生物的飞行方式、飞行原理和翅膀的扑动模式为扑翼微型飞行器设计提供理论和仿生学依据。

其次，设计并优化了扑翼机传动机构，并且对扑翼机制造的参数选择做了初步设定。

最后，设计并计算了柔性膜扑翼飞行器的升力和推力，发现与刚性扑翼相比，膜扑翼的柔性对升力的影响不大，但是大大地增大了推力的正峰值，使得推力有较大的增加，从而改善了扑翼飞行器的气动性能。本文所做的研究对扑翼飞行器的设计有一定的指导作用。

关键字： 仿生，传动机构，扑翼机

abstract

Simulate the flight of birds has long been a dream of mankind, Birds flying skills than the existing fixed-wing aircraft to be lightweight and efficient lot, Compared to conventional aircraft based on the principle of bionics flapping-wing aircraft, Just a flapping wing system can replace the propeller or a jet engine to provide thrust,

They can play a role in lifting surfaces and control surfaces, Thus has the potential to simplify the structure and reduce the weight of the aircraft. From the existing research data shows that for birds and insects,

Flapping wing flight speed flight when the required power and is much smaller compared to conventional aircraft,

And has excellent vertical or short takeoff and landing capability.

The future of the country will have to open low-altitude areas, which for the purposes of general aviation, is a rare opportunity for development.

In this paper, design issues related to multi-DOF flapping wing MAV were studied. The main contents include:

First, from insects and birds wings constructed to analyze two types of flying creatures in flight mode, flight principle and mode of flapping wings flapping-wing micro air vehicle designed to provide the basis for the theory and bionics.

Secondly, the design and optimization of the transmission mechanism ornithopter, and manufacturing parameters on the ornithopter made a preliminary selection set.

Finally, the design and calculation of the flexible membrane flapping wing aircraft lift and thrust, found that compared with the rigid flapping wing, had little effect on the flexible membrane flapping wing lift, but it greatly increases the positive peak thrust, making the thrust has larger increases, thereby improving the aerodynamic performance of flapping wing aircraft. This paper studies done on the flapping wing aircraft design has a guiding role.

目录

引言.....	1
0.1 扑翼机研究的背景和意义.....	1
0.2 扑翼机的应用前景.....	1
0.3 扑翼机发展概况.....	2
第一章 扑翼生物飞行与扑翼机翼型.....	3
1.1 鸟类和昆虫的翅膀结构与飞行状态.....	3
1.2 翼型分析.....	4
第二章 扑翼机构设计和参数选定.....	6
2.1 传动机构选用.....	6
2.2 扑翼机的参数选择.....	7
2.3 机翼五杆机构的设计和计算.....	8
2.4 翼型设计.....	9
2.5 蒙皮工艺.....	10
结论.....	10
参考文献.....	10

引言

0.1 扑翼机研究的背景和意义

自古以来，人们就梦想着在天空自由翱翔，对鸟在滑翔状态下的研究使人类乘着飞机上了天。一般情况下，昆虫和鸟类翅膀具有很大的机动灵活性，生物超强的飞行能力也引起了人们的极大兴趣，如昆虫利用其薄如蝉翼的翅膀高频振动，能够实现前飞、倒飞、侧飞及倒着降落等特技飞行。对生物生理结构和飞行机理的研究为仿制出具有更大飞行灵活性的新型扑翼飞行器打下坚实基础。

随着研究的深入，特别是固定翼微型飞行器在低雷诺数下所遇到的难于克服的空气动力学问题和抗干扰稳定飞行问题，促使人们开始寻找新的高升阻比升力机制和抗干扰飞行技术。自然界的飞行生物为此提供了最佳的示范。

仿生扑翼飞行器是一种模仿鸟类和昆虫飞行、基于仿生学原理设计制造的新型飞行器。扑翼飞行器与固定翼和旋翼飞行相比，它便具有独特的优点：如原地或小场地起飞，极好的飞行机动性和一定的空中悬停性能，它将举升、悬停和推进功能集于一扑翼系统，可以用较小的能量进行长距离飞行。

0.2 扑翼机的应用前景

无论是在军事领域还是在民用领域，扑翼机都有十分诱人的应用前景。在军事上，扑翼机可用于敌情侦察、目标追踪、电子干扰、损伤评估、核生化取样、部署传感器、中继通信、甚至主动进攻和防御。首先，微型飞行器可用于低空或近距离的侦察和监视。载有全天候图像传感器的微型飞行器可以在几百米的高度，甚至更近的距离对目标实施侦察监视。尤其是对卫星和军用侦察机触及不到的盲区或人员无法涉足的地区进行侦察。同时可以被部署到适当的位置，为固定而隐蔽的地面传感器实时传送侦察信息。其他大型飞行器就难以在这样的复杂环境中完成相应任务。其次，微型飞行器能够承担通信中继、电子干扰和攻击等任务。虽然单架微型飞行器的干扰信号很小，但当大量的微型飞行器接近敌方雷达天线作用区时，可达到有效的干扰效果。在民用上，微型飞行器可用于各类监测、监控、巡视、搜救、摄影、测绘、调查和考察。比如环境监测、灾情监测、交通道路监控、边境巡逻与控制、毒品禁运、农业勘测、大型牧场巡逻、城区监视和航空摄影等。

0.3 扑翼机发展概况

如图 0.3.1 所示为美国佐治亚理工大学（GTRI）研制的仿昆虫微型飞行器“Entomopters”。它有蝴蝶翅膀状的两对机翼，翼展为 25.4cm，使用往复式化学肌肉（RCM, Reciprocating Chemical Muscle）带动扑翼上下扑动。RCM 是一种不通过燃烧反应就可将化学能转化为机械能的机构，具有较高的能量转换效率。设计的独特性在于尾部的天线可以增加飞行器的平衡，腿部兼作燃料箱，同时也增加了横滚的稳定性。



图 0.3.1 美国佐治亚理工大学的“Entomopters”

美国加州大学伯克利分校自 1998 年开始根据仿生学原理进行设计研制了一种微机械飞虫 MFI，如图 1.10。它能模仿苍蝇的飞行特点，尺寸为 10~25mm，重量仅 43mg，采用压电石英驱动飞行器的机翼振动。目前只能作无控制短暂飞行。

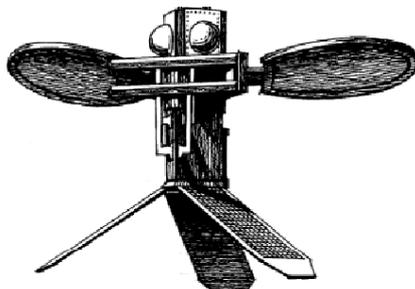


图 0.3.2 美国加州大学伯克利分校的 MFI

微型飞行器不是常规飞行器的简单缩小，其气动力、结构设计、动力配置、飞行动力学和导航控制技术等皆有不同于常规飞行器的特点，尺寸的微型化给微型飞行器的研制带来了许多难以克服的困难。从微型飞行器的研究现状来看，虽然已经取得了相当的技术成果，但是总的来说，微型飞行器还处于试验阶段，其进一步发展要达到实用化目标，还期待诸多领域的关键技术问题的解决。

第一章 扑翼生物飞行与扑翼机翼型

扑翼飞行是自然界中昆虫和鸟类普遍采用的飞行模式。在经历了 1.5 亿多年的进化历程后，它们具备高超的飞行技巧，可以在较短的时间内完成复杂的飞行动作。

生物飞行时的 Re 数很小，将其翅膀在风洞的定常来流条件下进行实验，结果表明在如此低的 Re 数范围产生的升力很低，例如果蝇翅膀的最大升力系数只有约 0.6，蜻蜓的只有约 1.0，这不足以平衡昆虫的自身重量，更不能提供机动飞行的附加气动力。显然，昆虫和鸟类飞行是利用非定常流来实现高升力的，因此研究与扑翼机同尺度的生物飞行原理，对于扑翼机的设计具有着重要的意义。

1.1 鸟类和昆虫的翅膀结构与飞行状态

自然界存在着两种扑动飞行物种：鸟类和昆虫类。鸟类在翅膀内分布有骨骼及连接肌肉，刚性的骨骼作为翅膀的前缘，其余部分为具有柔性的羽毛，如图 1.1.1 所示为三种典型鸟类(翼龙、鸟、蝙蝠)的翅膀示意图。鸟依靠肌肉的收缩，带动骨骼作进行扑动，羽毛的柔性可使翅膀改变形状。由于具有一定的重量，使得鸟类翅膀的扑动频率较低，且相对效率没有昆虫高。鸟类翅膀的运动以上下和俯仰运动为主，依靠前飞速度，来提供必要的升力，类似于固定翼产生的升力原理，因而它们经常处于前飞和滑翔状态，而悬停能力较差。蜂鸟是个例外，它的飞行方式更像一只昆虫。在研制扑翼机时，如何再现鸟翅膀的结构将是一个巨大的挑战。

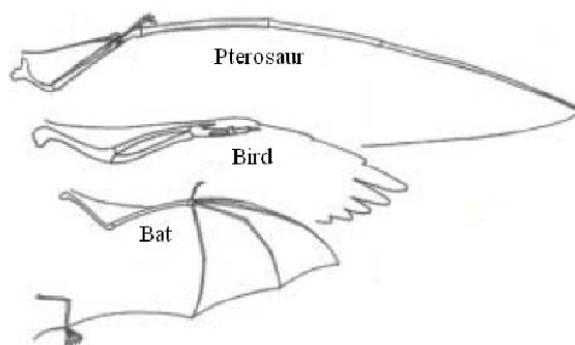


图 1.1.1 典型的鸟类翅膀

对于昆虫来说，带动翼扑动的骨骼结构全部集中于翼根，昆虫翼为一韧性膜状翼，薄而且轻，约为自身重量的 1% 以内，如图 1.1.2 所示。它为人设计微型飞行器提供了最可行的效仿模型。由于昆虫的尺寸和重量小，与鸟的扑动有很大的不同。带动翼扑动的激振源全部由翼根完成，飞行时常处于悬停状态，且具有更高的机动性。它与固定翼、

旋翼和鸟类飞行的气动特性存在巨大的差异。



图 1.1.2 典型的昆虫翅膀

1.2 翼型分析

1.2.1 扑翼机翼型的升推力

扑翼相对于固定翼而言，在其扑动时，不仅能产生升力同时还能产生推力，如图 1.2.1.1 所示。

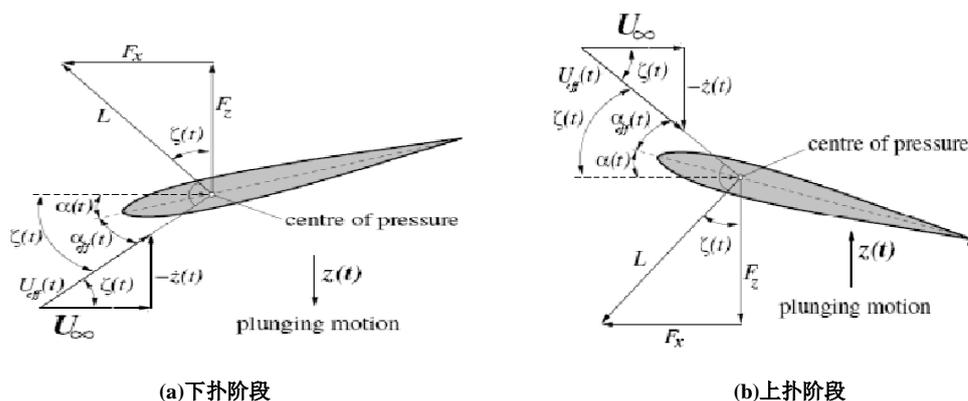
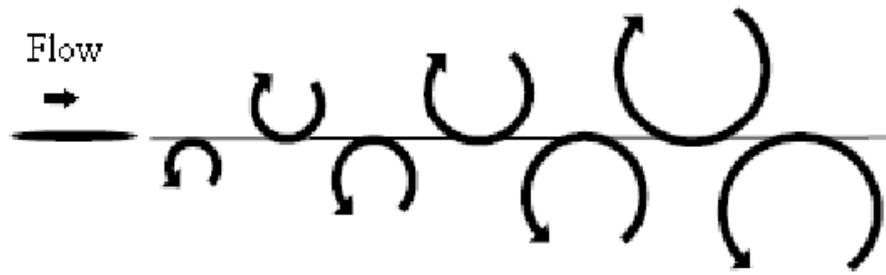


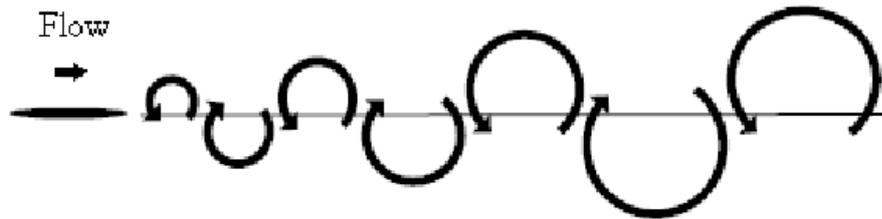
图 1.2.1.1 扑翼机扑动时的气动示意图

1.2.2 卡门效应与扑翼的推力

当扑翼在上扑阶段与下扑阶段之间过渡时，每次都会在后缘处产生一个启动涡随气流向后运动，最后在后缘处产生一系列尾涡，简称为涡街。1935年 vonKármán 在研究中发现，涡街中尾涡的位置和方向决定了机翼产生的是推力还是阻力。如果机翼产生的尾涡分布如如图 1.2.2.1(a)所示排列，上排涡方向为顺时针，下排涡方向为逆时针，尾涡中各处的诱导速度与来流方向相反。受到尾涡诱导作用，尾流在来流方向上有与来流方向相反的流动，因此机翼会受到与来流方向相同的作用力，也就是阻力。为了纪念它的发现者 vonKármán，这样的尾涡分布称为卡门涡街。如果机翼产生的尾涡分布如如图 1.2.2.1(b)所示排列，上排涡方向为逆时针，下排涡方向为顺时针，尾涡中各处的诱导速度与来流相同，因此机翼会受到与来流方向相反的作用力，也就是推力。



(a) 诱导出阻力



(b) 诱导出推力

图 1.2.2.1 涡街

本章小结

本章从昆虫和鸟类翅膀构造出发，分析了两类飞行生物的飞行方式，进而总结了它们的飞行原理和翅膀的扑动模式。可以说，昆虫和鸟类的高超飞行技巧得益于它们复杂的翅膀运动，翅膀的多维扑动为扑翼微型飞行器设计提供理论和仿生学依据。

第二章 扑翼机构设计和参数选定

早期的仿生扑翼的驱动方式采用橡皮筋的拉伸，而现代的驱动方式更加多样化，作为扑翼驱动探索研究，有人工肌肉驱动机构、压电励磁驱动机构、静电驱动和机械机构传动等方式，现阶段采用较多的还是利用机械机构方式传动。不论采用何种驱动方式，扑翼运动主要根据仿生原理进行驱动机构的设计。

扑翼机构目前主要是单自由度运动，这类驱动的结构简单、重量轻，因而，目前微型飞行器多采用单自由度扑翼机构，即为平面上下扑动，这种扑动方式，如果是刚性翼，平均升力为零，只能依靠翼的被动柔性变形产生升力，给气动控制带来难度。为了使扑翼的运动更符合生物翅膀运动的形态，符合生物飞行的空气动力学，必须研究多自由度扑翼驱动机构问题，相对于单自由度扑翼而言，多自由度的结构相对复杂、设计难度大。

2.1 传动机构选用

平面扑翼机构采用的连杆机构有四杆五接头、五杆七接头、六杆七接头、七杆九接头等机构形式。关于四杆六接头如图 2.1.1 所示。

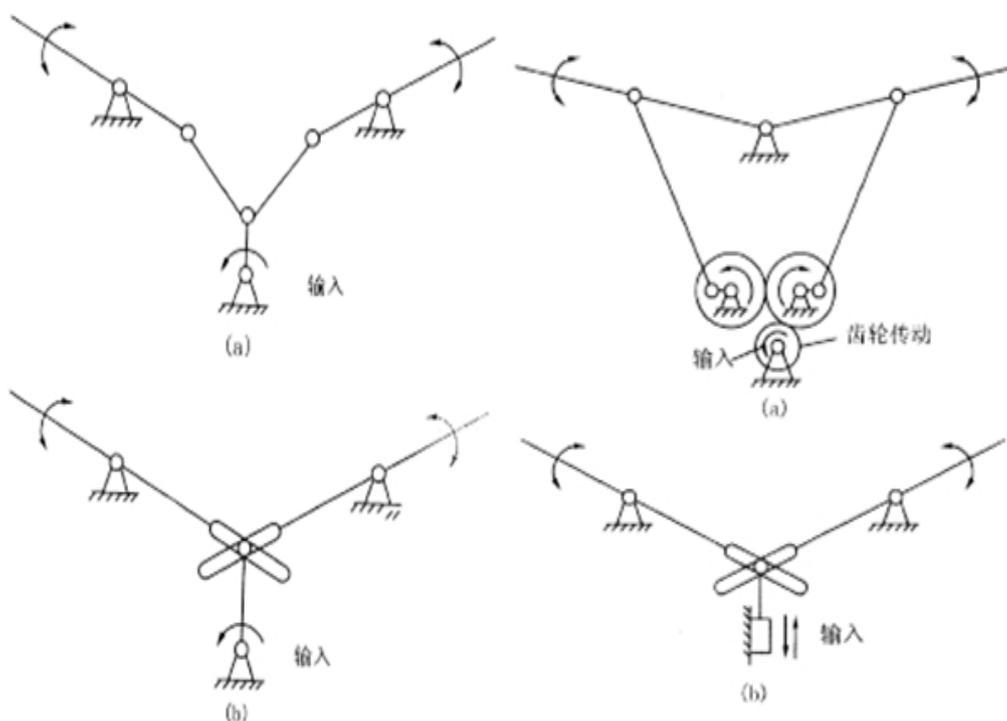


图 2.1.1 非同步扑与同步扑翼机构

图 2.1.2 双曲柄双摇杆扑翼机构

该机构为大多数直翼的扑翼飞行器的驱动机构，结构简单，制作简单。市面上的飞

飞鸟就是该机构。这种机构有个致命的缺点，就是左右运动不对称，会在运动过程中产生振动，随着转动频率的增加，振动频率也会增加，会导致飞行过程中的摇晃。图 2.1.2 为双曲柄双摇杆扑翼机构，可以保证左右运动的完全对称。该机构在扑翼飞行器的设计中有着广泛的应用。本设计将采用该种机构作为机翼的传动机构。

2.2 扑翼机的参数选择

2.2.1 动力系统的参数选择和计算

通过对几种飞行器的机翼扇动频率的统计得出下表

表 1 各种飞行器的机翼扇动频率

项目	频率
家鸽	2Hz
德国智能鸟	1.53Hz
直翼海鸥模型	1.7Hz
ASN211 扑翼无人机	4Hz
仿昆虫扑翼机	5Hz

在此参考家鸽飞行频率得出本设计中飞行器的设计频率：2Hz。

2.2.2 齿轮的选用

由于条件限制，齿轮的材料必须是轻质材料，而且必须有一定的强度，因此可在网上购买到一对齿轮作为曲柄圆的，模数 0.5，齿数 144。

在此配一个双联齿轮，连接电机和曲柄圆，模数 0.5， $Z_1=50$ ， $Z_2=14$ 。该齿轮组的传动比为 50.3。

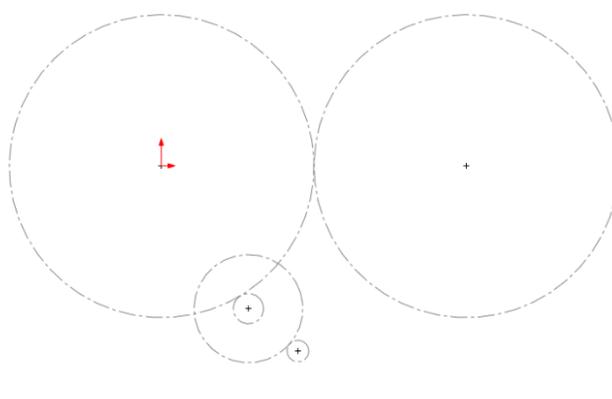


图 2.2.1 减速齿轮组结构简图

2.2.3 电机的选用

本设计需对电机进行无级变速，故选用专用的航模电机。由上述传动比 $i=50.3$ 齿轮转速=120r/min 得电机转速： $n=6036r/min$

2.2.4 飞行器机身尺寸的确定

以一对啮合齿轮的总长度为机身的宽度，家鸽躯体的比例，得出

翼展：1300mm至1500mm

机身长度：800mm

机翼宽度：210mm

2.3 机翼五杆机构的设计和计算

本设计的一大难点就是设计能仿真鸟类折翼运动的机构，通过学习和研究，提出如下图的由曲柄摇杆机构和双摇杆机构复合而成的无杆机构。该机构中杆1、杆2、杆3和机架组成的曲柄摇杆机构能完成主翼的摆动。杆2、3、4组成双摇杆机构，该机构相对曲柄四杆机构中的连杆做相对运动，连个机构公用杆2。双摇杆机构可以完成飞行器的折翼动作。合成运动为平面运动，表现为鸟类翅膀的扇动。通过 solidworks 中的块功能，定出机架两支持点的位置和主翼的摆动范围。调整点 O 的位置定出符合条件的杆 a 和杆 b 的长度。

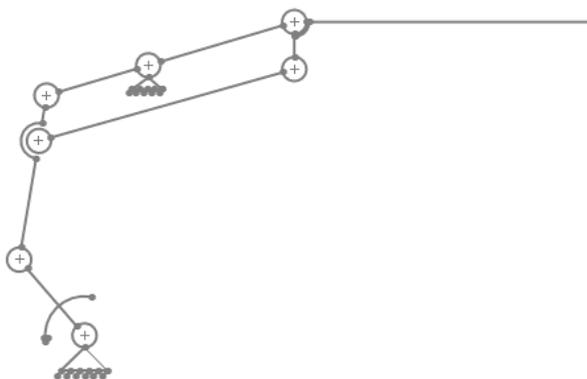


图 2.3.1 曲柄摇杆复合双摇杆机构

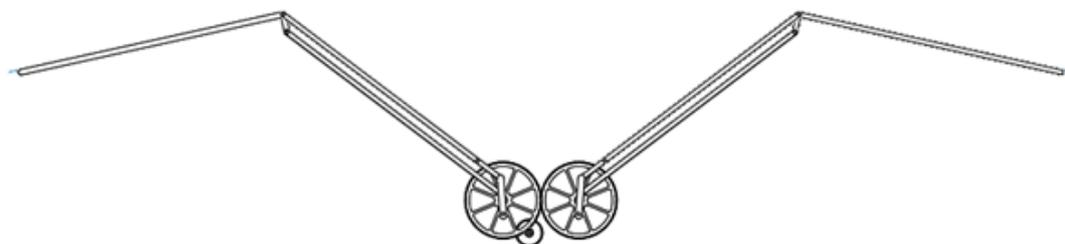


图2.3.2实体设计中的机翼五杆机构

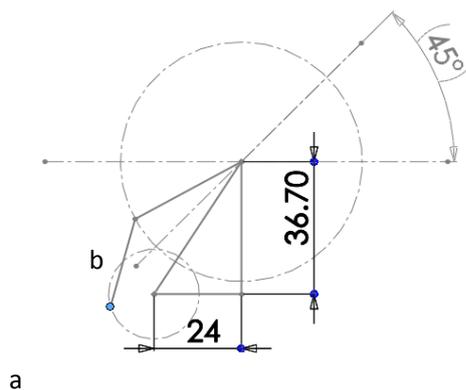


图 2.3.3 杆长参数图

表 2 机翼五杆机构的结构尺寸

曲柄	12.5mm
连杆	26.5mm
摇杆1	270mm
机架	43.8mm
摇杆2	16mm

2.4 翼型设计

机翼的形状决定着飞行器的飞行性能，在高速时正确的翼型可以产生升力，在低速的时候，正确的翼型可以保证机翼附近的空气不紊乱，使空气规则流动，产生规则固定的空气阻力。



图 4-5 主翼翼型

主翼翼型参考飞机翼型设计，中间圆孔和方孔是给主翼上杆和下杆的安装留出的。



图 4-6 外翼翼型

2.5 蒙皮工艺

材料的选择涉及仿生扑翼飞行的整个过程，设计中的重量轻、柔性以及微型化等要求都与材料有关。如在驱动结构设计中，压电陶瓷和化学肌肉等智能材料都被采用。另外，为保证整体重量轻，翼有一定强度且能灵活变形，聚脂化合物及碳纤维等也被广泛采用。在研制过程中，必须综合考虑扑翼飞行的结构特性、运动和动力特性及机构制作的工艺特性要求来选择合适性能的材料。

本章小结

本章主要对模型扑翼机的机构选用和电动机、连杆长度、齿轮等参数做出了确定，为扑翼机模型仿真和加工制作做出了指导。

结论

本文的主要工作如下：

1. 首先，昆虫和鸟类飞行是利用非定常流来实现高升力的，因此研究与扑翼机同尺度的生物飞行原理，对于扑翼机的设计具有着重要的意义。本文从昆虫和鸟类翅膀构造出发，分析两类飞行生物的飞行方式、飞行原理和翅膀的扑动模式为扑翼微型飞行器设计提供理论和仿生学依据。

2. 确定了仿生扑翼机模型的各种机构和参数，为扑翼机模型仿真和加工制作做出了指导。

参考文献

- [1] 周凯，方宗德，曹雪梅，张明伟著. 单曲柄双摇杆扑翼驱动机构的优化设计. 西安. 航空动力学报 2008.
- [2] 崔晓峰，魏瑞轩，周新立，邵苗，黄建华著. 仿鸟扑翼飞行器建模分析. 西安. 系统仿真学报. 2009. 8.
- [3] 周骥平，武立新，朱兴龙著. 仿生扑翼飞行器的研究现状及关键技术. 扬州. 综述. 2004. 6.
- [4] 缪瑞平著. 扑翼飞行器驱动装置的设计. 沈阳. 沈阳航空工业学院学报. 2007. 2.