

蜻蜓起飞过程飞行特征实验

郑孟宗¹, 李秋实¹, 潘天宇¹, 张健²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 中国航空发动机集团有限公司 重大专项工程部, 北京 100097)

摘 要: 针对蜻蜓自由起飞过程和准自由起飞过程进行实验观测,采用两个光轴相互垂直的高速摄像机进行拍摄,通过特征点匹配和三维重构方法准确地捕捉了两种起飞过程中蜻蜓身体和翅膀的运动参数,并进行运动特征分析与对比。实验结果表明:蜻蜓在自由起飞过程中采用同步振翅,离地后逐步转换成异步振翅(约 110°),最大瞬时竖直加速度可以达到 20 m/s²;在准自由起飞过程中采用异步振翅(相位差 180°),之后相位差逐步降低,最大瞬时竖直加速度为 12 m/s²;此外发现同步振翅、大攻角下拍及大拍动角有利于升力的产生。

关 键 词: 蜻蜓; 起飞; 运动规律; 气动力; 飞行参数

中图分类号: V211.7 **文献标志码:** A

Experiment on flight performance of dragonfly during take-off

ZHENG Mengzong¹, LI Qiushi¹, PAN Tianyu¹, ZHANG Jian²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine

Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Department of Major Specific Project,

Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China)

Abstract: In view of the experimental observation of the free takeoff process and the quasi free take-off process of dragonflies, two high-speed cameras were photographed with each other perpendicular to the optical axis. The motion parameters of the dragonfly body and wings during the two take-off processes were accurately captured by feature point matching and three-dimensional reconstruction, and the dynamic analysis and comparison were carried out. The experimental results showed that the dragonfly adopted synchronous vibration wing during the free take-off process and gradually transformed into asynchronous vibration wing (around 110 degrees), the maximum instantaneous vertical acceleration could reach 20 m/s²; with use of asynchronous vibration wing (phase difference of 180 degrees) in the course of quasi free take-off, the phase difference gradually decreased, and the maximum instantaneous vertical acceleration was 12 m/s². In addition, synchronous flap, large angle of attack and large flapping angle were favorable for lift.

Key words: dragonfly; take-off; motion law; aerodynamic force; flying parameters

收稿日期:2019-03-15

作者简介:郑孟宗(1989—),男,博士生,主要从事仿生流体机械研究。

引用格式:郑孟宗,李秋实,潘天宇,等. 蜻蜓起飞过程飞行特征实验[J]. 航空动力学报,2019,34(7):1450-1458. ZHENG Mengzong, LI Qiushi, PAN Tianyu, et al. Experiment on flight performance of dragonfly during take-off[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7): 1450-1458.

微型飞行器(micro aerial vehicle, MAV)在未来军事和民用领域的应用日益广泛^[1],但是微型飞行器绝不是常规飞行器在尺度上的简单缩小,面临许多技术难题,其中低雷诺数空气动力学是其最为根本的技术瓶颈之一^[2]。研究学者针对固定翼、旋翼、扑翼三种形式的微型飞行器形式开展研究,发现扑翼相较于另外两种形式效率更高、并且能够实现更小的尺寸。因此扑翼被学者认为更有希望是为未来微型飞行器提供升力和推力。自然界中的绝大多数昆虫的身体尺寸与微型飞行器相近,均采用扑翼飞行模式,因此昆虫扑翼飞行机理的研究越来越受到相关人员的关注^[3-9]。在众多飞昆虫当中,蜻蜓因为其独特的生理结构和高超的飞行能力^[10]和效能^[11]从而受到广泛的关注。

在活体观测实验方面 Wakeling 等^[12-14]利用高速摄像机,拍摄得到滑翔和自由前飞状态下蜻蜓的翅膀和身体运动参数,并用准定常分析法计算了飞行过程中的升力系数和阻力系数。王浩^[15]使用投影梳状条纹插值法测量了蜻蜓前飞和转弯状态下的运动参数。Hendricks^[16]利用 3 台相机拍摄了自由飞行的蜻蜓,提出用拱形变形量与弦长的比值来表示翅膀拱形变形情况。高倩等^[17]利用两台高速摄像机拍摄蜻蜓爬升过程飞行特征,得到高爬升角下其翅膀和身体运动参数。在数值模拟方面孙茂等^[18]利用三维数值模拟方法计算了蜻蜓前后翅不同相位差下的升力和推力系数,张锐等^[19]采用有限体积法(FVM)研究了蜻蜓非对称扑动时的气动特性,孟令兵等^[20]利用计算流体力学/计算结构力学(CFD/CSD)的双向流固耦合方法分析了蜻蜓柔性翼的影响规律。当前研究主要针对的还是悬停、前飞等基本过程,对于机动性过程,尤其是起飞的研究还鲜有报道。

当前已公开的扑翼型微型飞行器距离完全自主飞行和满足实用化要求还有较大的差距,尤其表现在起飞阶段^[21-23]。现有微型飞行器的起飞方式主要有两种:一是通过翅膀扑动逐步产生足够大的升力进而起飞;二是利用投掷或者其他方式完成起飞之后转换为扑翼模式。前者起飞时间较长,机动性能差,后者起飞时间短,但是在转换扑翼飞行过程中存在稳定性差的缺点,本质上是微型飞行器的扑翼规律设置单一,并未合理优化扑翼的气动性能。

在之前的研究中,部分学者针对蝴蝶、蚜虫、蜂蝇等昆虫的起飞过程进行的研究^[24-26],但是并

不能很好的满足当前微型飞行器的起飞需求,主要是原因是起飞时间长,需要扑动超过 10 个周期才能完成起飞,同时这些昆虫无法实现滑行飞行,无法实现投掷后起飞。在蜻蜓真实飞行过程中,恰好存在两种起飞模式。一是自由起飞,即从平地或者树枝上完成起飞;二是滑翔中起飞,蜻蜓是极少数可以滑翔的昆虫,可以在滑翔过程中重新振翅产生气动力完成再一次起飞。因此研究蜻蜓的起飞过程可以得到其两种起飞模式的振翅规律,进而为微型飞行器克服起飞困难奠定基础。

本文采用两台光轴相互垂直的高速摄像机对蜻蜓进行活体拍摄,拍摄两种情况的起飞过程:一是自由起飞,没有任何限制,用以模拟真实过程中蜻蜓自由起飞过程;二是准自由起飞,即将蜻蜓用细线悬挂后,再次让其起飞,用以模拟真实过程中蜻蜓悬停飞行中突然启动的过程。本文针对这两种起飞过程,选取不同的飞行序列,使用特征点匹配和三维重构方法对其进行运动参数分析和对比,探究了不同起飞过程中蜻蜓身体和翅膀的运动规律,为仿生流体力学理论探索和微型飞行器工程应用提供了数据基础和指导。

1 实验方案及运动参数提取

1.1 实验系统

蜻蜓扑翼飞行实验观测系统同文献^[17]中一样,如图 1 所示,包括两台高速摄像机及其配套控制器显示装置(CDU)、两盏摄影灯和一个观察箱。实验中高速摄像机拍摄频率为 1 000 帧/s,分辨率为 1 280 像素×1 024 像素,所使用的观察箱是利用透光性足够好的玻璃制成,尺寸为 780 mm×780 mm×1 000 mm,观察箱上方为两盏功率为 1 000 W 的石英灯,可为拍摄提供照明补偿。

1.2 实验对象

实验对象选取蜻蜓种类为黄蜻(*pantala flavescens*),其广泛分布于世界各地,具有普遍意义。蜻蜓在北京航空航天大学周边池塘附近捕获,为保证获得蜻蜓真实飞行状态,本实验所有蜻蜓的拍摄均在捕获后 6 h 内完成。

蜻蜓捕获后将放进冰箱进行低温麻醉^[16],方便对蜻蜓的形态参数进行测量。形态参数包括:身体和翅膀的质量和,身体头尾之间的距离(身长),翅根到翅尖的距离(翅长),翅前缘到尾缘的距离(弦长)

之后用油性黑墨水在蜻蜓翅膀上进行标记,

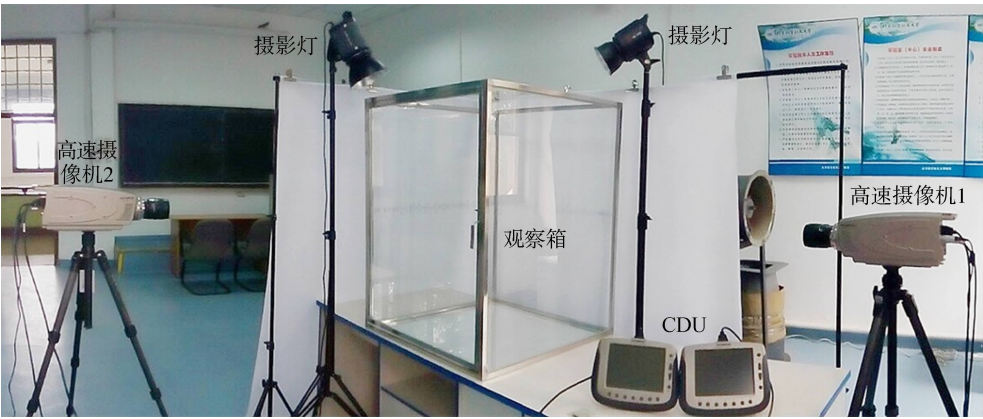


图 1 实验系统的组成及布局
Fig. 1 Experiment system setup in lab

如图 2 所示,标记点覆盖翅膀前缘,尾缘以及中间弦向位置,将作为翅膀三维重构过程中的参考点,标记点质量占整个蜻蜓身体质量的比例不超过千分之三,对蜻蜓飞行情况的影响可以忽略不计。

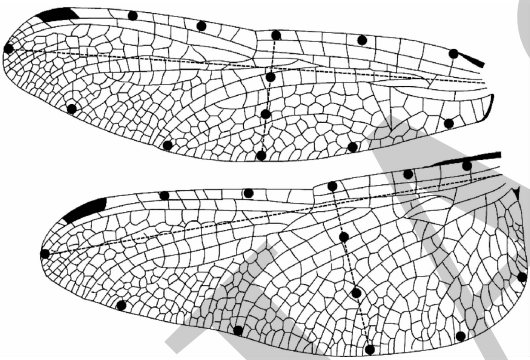


图 2 翅膀标记点分布
Fig. 2 Distribution of marked points of wing

1.3 实验方案

1.3.1 自由起飞实验

自由起飞实验将蜻蜓放置在固定平台上,在没有干扰的情况等待其起飞,其翅膀开始运动时摄像机开始录制,如图 3 所示。

1.3.2 准自由起飞实验

实验室环境中蜻蜓极少出现滑翔过程,由于其真实滑翔过程速度范围在 $0.5 \sim 2.0 \text{ m/s}^{[12]}$,存在极小的滑翔速度,过程中蜻蜓翅膀没有任何运动。因此实验室中准自由起飞实验是用悬挂绳在蜻蜓两翅之间绑住,悬挂于观察箱内,等待其起飞,同样是其翅膀开始运动时摄像机开始录制,如图 4 所示。悬挂绳提供的拉力近似于其滑翔过程中的气动升力,忽略其飞行速度。经测试,细线捆绑并不会影响蜻蜓的飞行能力。同时由于悬挂绳

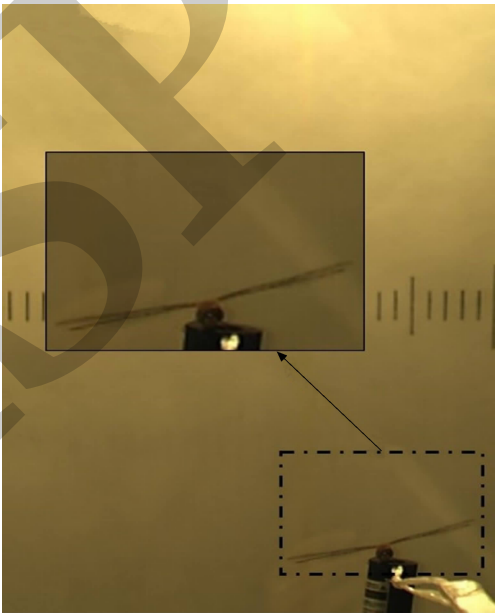


图 3 自由起飞实验过程示意图
Fig. 3 Schematic diagram of voluntary take-off experiment

为非弹性绳,当其出现弯曲时,证明此时悬挂绳上没有拉力,气动力足够克服重力。

1.4 运动参数定义及提取

基于三维重构得到的标记点和身体特征点三维坐标值,即可提取蜻蜓身体和翅膀的运动参数,详细定义方法详见文献[17]。身体运动参数包括:质心轨迹和身体姿势;翅膀运动参数包括:拍动频率、相位差、拍动角、攻角、扭转角、偏离角和拍动平面倾角,如图 5 所示。提取运动参数前需要建立坐标系,包括固定于空间一点的世界坐标系和固定于蜻蜓身体质心的相对坐标系。世界坐标系主要描述蜻蜓的质心轨迹和身体姿势,相对坐标系则用以描述翅膀的运动参数。

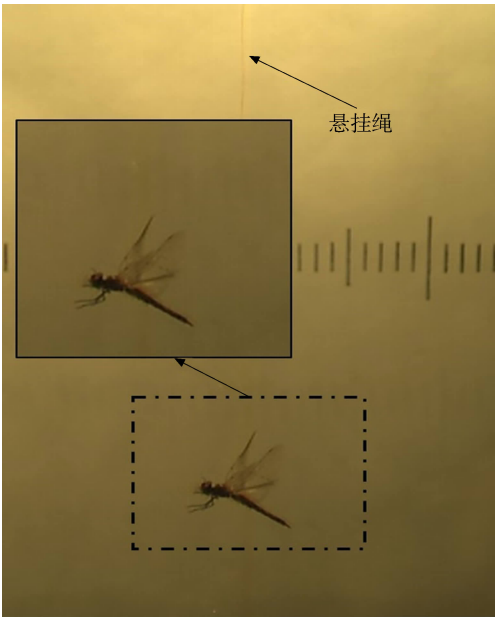
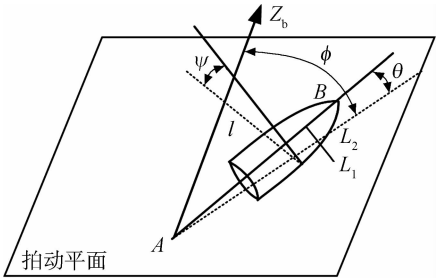
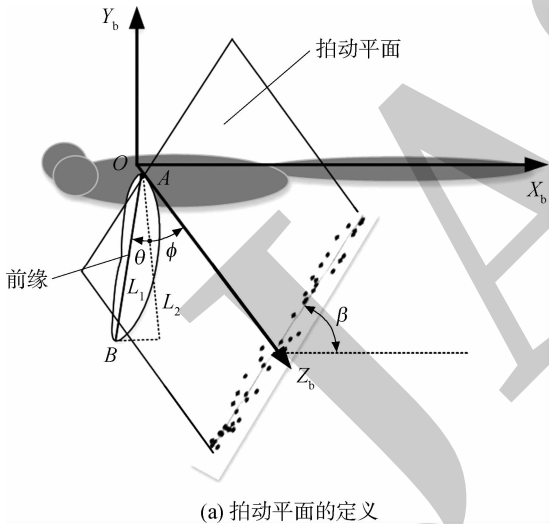


图 4 准自由起飞实验过程示意图
Fig. 4 Schematic diagram of quasi free take-off experiment



(b) 基于拍动平面定义运动参数
图 5 翅膀的运动参数定义方式
Fig. 5 Definition of wing kinematics parameters

2 自由起飞过程飞行特征分析

针对自由起飞过程,处理分析了 4 组蜻蜓的自由起飞过程,4 组蜻蜓的身体尺寸及质量接近,其中质量的最大相对差距为 8%,身体长度和翅膀长度的最大相对差距为 3%,因此忽略质量及身体尺寸的影响。

进一步分析上述 4 组蜻蜓的自由起飞过程,将这 4 组蜻蜓分别命名为 D1、D2、D3、D4,它们部分实验观测结果如表 1 所示。

由表 1 可知,4 组实验结果中运动参数极为相似。整个起飞过程时间 4 组实验分别为 350, 380, 300, 320 ms;位移方面,向上(竖直方向)位移最大差别为 0.08 m,向前(水平方向)位移最大差别为 0.02 m;前后翅平均振翅频率最大差别分别为 0.7 Hz 和 0.3 Hz,前后翅拍动角最大差别分别为 1.2°和 0.7°;前后翅相位差最小值均为 0°(同步振翅),最大值范围是从 109.2°到 110.6°;前后翅下拍行程最大攻角的最大差别分别是 1°和 4°。因此为了方便,接下来的分析研究将针对 D1 的实验数据展开。

表 1 4 组自由起飞实验的部分观测结果

Table 1 Partial observations of four groups of voluntary take-off experiments

组别	起飞 时间/ms	位移/m		平均振翅频率/Hz		平均拍动幅值/(°)		相位差/(°)		下拍行程最大攻角/(°)	
		向上	向前	前翅	后翅	前翅	后翅	最小值	最大值	前翅	后翅
D1	350	0.25	0.12	25.8	27.3	73.3	65.9	0	109.5	86	84
D2	380	0.31	0.13	25.4	27.1	74.5	65.4	0	109.2	86	88
D3	300	0.23	0.11	26.1	27.4	74.2	66.1	0	110.6	87	86
D4	320	0.23	0.12	25.5	27.3	73.8	65.6	0	108.9	87	86

2.1 自由起飞过程简述

整个自由起飞过程包含大概 8 个振翅周期,总共持续时间大约 0.35 s。由于高速摄像机拍

摄频率为 1 000 帧/s,因此需要处理约 350 张拍摄照片。

以蜻蜓开始振翅时间为零时刻,最开始蜻蜓

同步振翅(前后翅相位差为 0°),同步振翅持续了 80 ms,之后后翅拍动加速,前后翅开始异步振翅。相位差从 0° 开始逐渐增加,此过程大概经历 200 ms 左右,最终前后翅相位差稳定在 110° 左右,自由起飞过程相位差变化如图 6 所示。

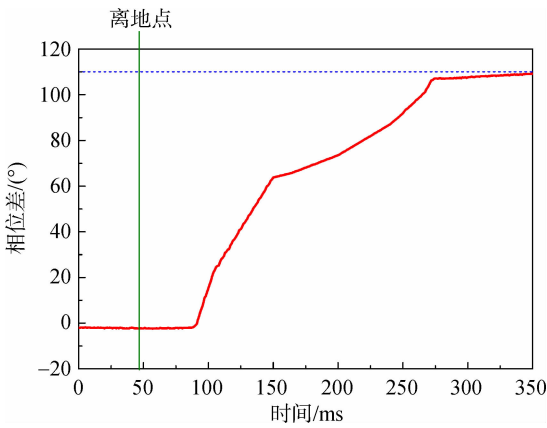


图 6 自由起飞过程前后翅相位差变化情况
Fig. 6 Variation in the phase difference during the entire process of voluntary take-off

2.2 自由起飞过程中质心运动

图 7(a)显示了蜻蜓自由起飞过程中质心的位移情况,图 7(b)是将前 100 ms 左右的的位移图放大的结果。将 0 时刻质心位置定位 $(0,0,0)$,同时由数据可知整个自由起飞过程 X 方向位移始终接近于 0,因此将忽略 X 方向位移。由图可知,整个自由起飞过程中蜻蜓向上飞行(Z 方向)约 0.25 m,向前飞行(Y 方向)约 0.12 m,同时可以发现起初只有 Z 方向位移,之后才出现 Y 方向位移, Y 方向位移出现的时间就是蜻蜓足离开平台的时间,此时刚好完成 1 个拍动周期。

将位移数据进行求导可以获得自由起飞过程中速度和加速度信息,如图 8 所示。

速度和加速度在整个自由起飞过程中都是波

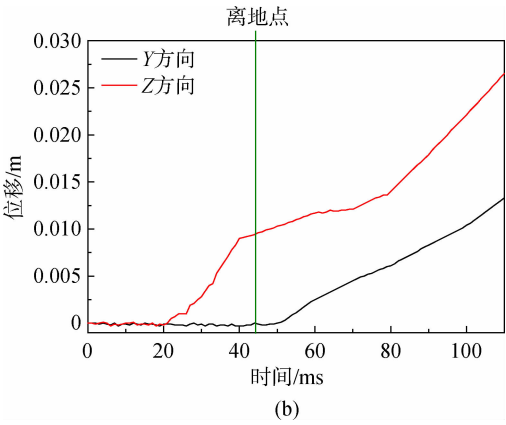
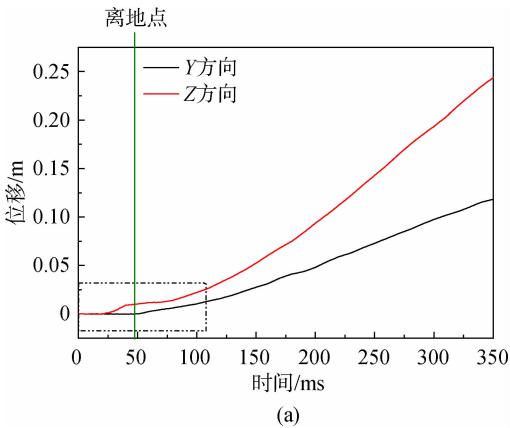


图 7 自由起飞过程位移随时间变化
Fig. 7 Displacement of the dragonfly centroid during the entire process of voluntary take-off

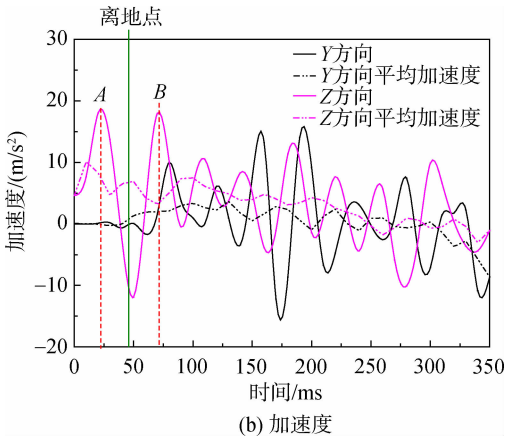
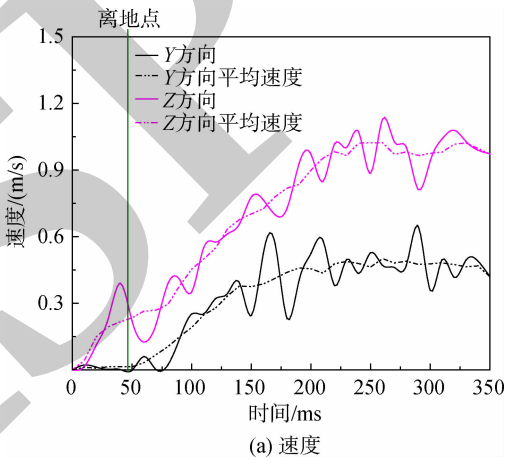


图 8 自由起飞过程速度与加速度随时间变化
Fig. 8 Velocity and acceleration of the dragonfly centroid during the entire process of voluntary take-off

动的,都是 Z 方向开始出现之后 Y 方向才出现,最终 Z 方向速度稳定在 0.8 m/s, Y 方向速度稳定在 0.25 m/s,加速度两者最终平均都在 0 m/s^2 附近。

在自由起飞过程中竖直方向加速度在最开始

的两个周期出现了极大值(如图 8 中 A 和 B 两点),达到 20 m/s^2 ,大约等于 2 倍的重力加速度,其他各组实验最大瞬时竖直加速度也都在 $18\sim 20\text{ m/s}^2$ 。

2.3 自由起飞过程中翅膀运动

图 9 显示了蜻蜓自由起飞过程中拍动角、翻转角、偏离角的变化规律。可以看到,蜻蜓除了第 1 周期振翅频率低(前翅 17.2 Hz ,后翅 19.2 Hz)之外,后续的振翅频率基本维持在 30 Hz 左右。此外,由拍动角可以看出,前后翅最大振幅均出现在第 1 周期,分别达到了 90.2° 和 92.0° ,此后振幅持续波动在 70° 左右。

由图 9 中翻转角可以发现一个新的现象,那就是蜻蜓在前两个周期下拍行程中翻转角(约 85°)显著大于其他周期(约 60°),联系上文中加速

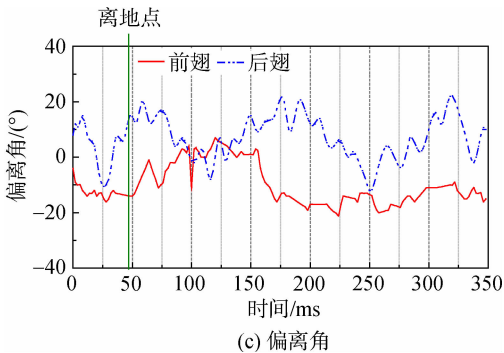


图 9 自由起飞过程中翅膀运动规律
Fig. 9 Time histories of wing flapping motion during voluntary take-off

度变化规律,可以猜测大的下拍行程翻转角可能有利于产生更大的升力。

3 准自由起飞过程飞行特征分析

针对准自由起飞过程,同样是分析处理了 4 组不同蜻蜓的飞行数据,也忽略质量及身体尺寸的影响。

结果显示,准自由起飞有着和自由起飞显著不同的运动规律,将这 4 组蜻蜓分别命名为 d1、d2、d3 和 d4,部分实验观测结果如表 2 所示。

由表 1 可知,4 组实验结果中运动参数极为相,因此为了方便,接下来的分析研究将针对 d1 的实验数据展开。

3.1 准自由起飞过程简述

准自由起飞过程大概涵盖 6 个周期,总共持续时间约 200 ms 。

以蜻蜓开始振翅时间为零时刻,最开始蜻蜓前翅向上拍动,后翅向下拍动(前后翅相位差为 180°),完全异步振翅大概持续了 10 ms ,此后前后翅相位差开始减小并最终达到相对稳定的状态,相位差大概约为 60° ,准自由起飞过程相位差变化如图 10 所示。

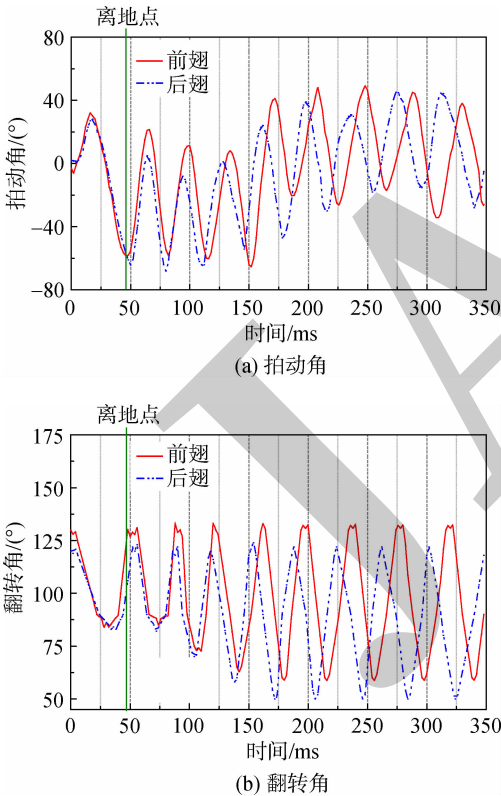


表 2 4 组准自由起飞实验的部分观测结果

Table 2 Partial observations of four groups of quasi free take-off experiments

组别	起飞	位移/m		平均振翅频率/Hz		最大拍动幅值/(°)		相位差/(°)	
	时间/ms	向上	向前	前翅	后翅	前翅	后翅	最小值	最大值
d1	180	0.07	0.05	29.0	29.3	85.1	85.2	60.2	180
d2	200	0.08	0.06	29.2	29.4	86.2	86.4	59.8	180
d3	175	0.07	0.05	29.1	29.3	86.0	86.1	61.3	180
d4	210	0.08	0.07	29.0	29.1	85.7	85.8	61.5	180

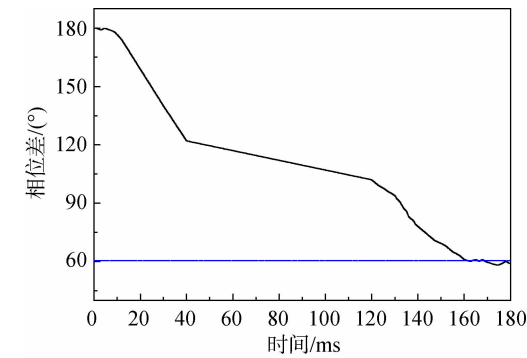


图 10 准自由起飞过程前后翅相位差变化情况
Fig. 10 Variation in the phase difference during the entire process of quasi free take-off

3.2 准自由起飞过程中质心运动

图 11 显示了蜻蜓自由起飞过程中质心的位移情况,将零时刻质心位置定位(0,0,0) m,同样整个准自由起飞过程 X 方向位移始终接近于 0,因此将忽略 X 方向位移。

由图 11 可知,起初一段时间 Z 和 Y 两个方向均没有出现显著的位移,但是蜻蜓已开始振翅,悬挂绳也会出现弯曲现象,说明此时气动力仅维持了重力,可以近似为悬停状态,蜻蜓属于调整状态。约 40 ms 之后 Z 和 Y 方向出现了位移,整个过程中蜻蜓向前飞行(Y 方向)约 0.05 m,向上飞行(Z 方向)约 0.07 m。

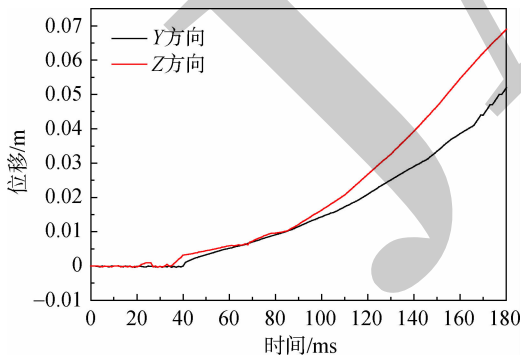


图 11 准自由起飞过程位移随时间变化
Fig. 11 Displacement of the dragonfly centroid during the entire process of quasi free take-off

将位移数据进行求导可以获得准自由起飞过程中速度和加速度信息,如图 12 所示。

速度和加速度起初并没有明显的变化,之后速度逐渐波动增长,两个方向的瞬时加速度最大值达到 12 m/s^2 ,其余各组实验结果两个方向的瞬时最大加速度也在 $(12\pm0.5)\text{ m/s}^2$ 。

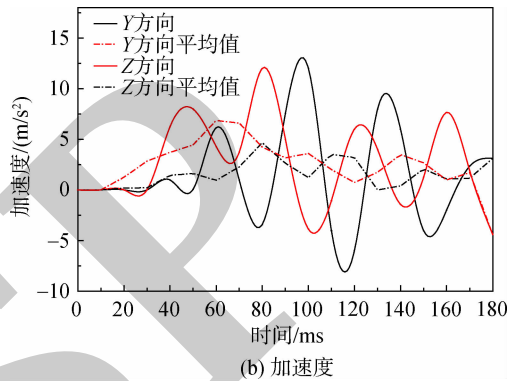
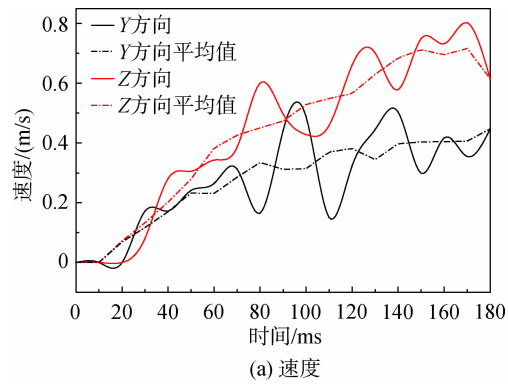
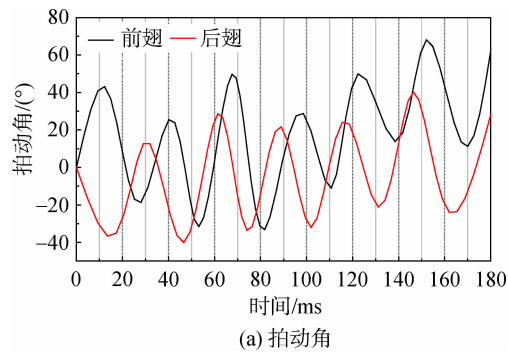


图 12 准自由起飞过程速度与加速度随时间变化
Fig. 12 Velocity and acceleration of the dragonfly centroid during the entire process of quasi free take-off

3.3 准自由起飞过程中翅膀运动

图 13 显示了蜻蜓准自由起飞过程中拍动角、翻转角、偏离角的变化规律。可以看到,蜻蜓除了第 1 周期振翅频率低(前翅为 28 Hz,后翅为 28.5 Hz)之外,后续的振翅频率基本维持在 30 Hz 左右,振翅频率要高于自由起飞。

此外,由拍动角可以看出,前翅最大振幅均出现在第 3 周期,达到了 85° ,显著大于其他几个周期,而后翅在整个过程中变化不大始终在 60° 左右。整个过程中翻转角变化均不大。



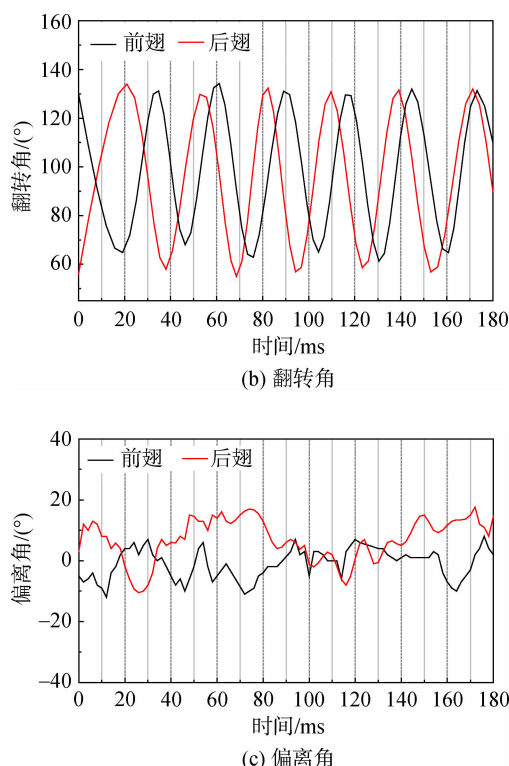


图 13 准自由起飞过程中翅膀运动规律

Fig. 13 Time histories of wing flapping motion during quasi free take-off

4 前后翅相位差对于气动力的影响机制

由文中第3节和第4节中关于蜻蜓自由起飞和准自由起飞运动规律研究可以发现两种起飞过程蜻蜓翅膀的振翅规律有着显著的不同,同时引起其身体质心的规律出现差异,在众多振翅参数中,前后翅相位差差异最为明显。

自由起飞中,蜻蜓最开始为同步振翅(前后翅相位差为 0°),之后逐渐增加,最终前后翅相位差稳定在 110° 左右;准自由起飞过程中相位差变化趋势正好相反,起初为 180° 异步振翅,之后相位差逐步减小,最终稳定在 60° 左右。结合文献[18]中关于蜻蜓不同前后翅相位差的数值模拟结果可以发现, 0° 相位差振翅可以产生更大的升力, 180° 相位差下升力和推力都比较小,可以更好的实现平衡状态。在实际过程中,自由起飞需要更大的升力,因此蜻蜓会采用同步振翅起动,之后增加;准自由起飞过程,由于蜻蜓开始处于平衡状态,其会采用 180° 相位差起动,保证平衡,但此时气动力较小,位移不明显,之后增大相位差,气动力增加。

5 结 论

蜻蜓针对不同的起飞过程会采用不同的振翅模式,以实现快速且稳定的起飞,这些对于未来微型飞行器起飞过程的扑翼运动设计提供数据支持。

1) 蜻蜓在自由起飞过程中采用同步振翅,大概需要一个拍动周期即可离地,离地后逐步转换成异步振翅,起初两个周期下拍行程的翻转角显著大于后续的周期,最大竖直加速度出现在前两个周期,达到约 20 m/s^2 ,可以猜测高的加速度与同步振翅和大的下拍行程翻转角有关。

2) 蜻蜓在准自由起飞过程(近似悬停状态后起飞)中起初采用 180° 相位差振翅,此阶段位移变化不明显,之后相位差逐渐减小,同时前翅拍动角有显著的增加,开始完成起飞过程,飞行过程中最大加速度达到约 12 m/s^2 。

3) 对比两种起飞过程,同步振翅更有利于产生更大的升力,下拍行程大攻角和大的拍动角也有利于产生更大的升力。

参考文献:

- [1] HOLLINGUM J. Military look to flying insects robots [J]. Indust Robot, 1998, 25(2): 124-128.
- [2] 李锋,白鹏,石文,等. 微型飞行器低雷诺数空气动力学 [J]. 力学进展, 2007, 37(2): 257-268.
LI Feng, BAI Peng, SHI Wen, et al. Low Reynolds number aerodynamics of micro air vehicles [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 37(2): 257-268. (in Chinese)
- [3] SUN Mao. Insect flight dynamics: stability and control [J]. Reviews of Modern Physics, 2014, 86(2): 615-646.
- [4] LIU H, AONO H, INADA Y, et al. Size effect in insect flight: leading-edge vortex, trailing-edge vortex and tip vortex [J]. Journal of Biomechanics, 2006, 39(6): 356-357.
- [5] NORBERG R A. The pterostigma of insect wings an inertial regulator of wing pitch [J]. Journal of Comparative Physiology, 1972, 81(1): 9-22.
- [6] YOUNG J, WALKER S M, BOMPHREY R J, et al. Details of insect wing design and deformation enhance aerodynamic function and flight efficiency [J]. Science, 2009, 325(5947): 1549-1552.
- [7] 兰世隆,孙茂. 微型旋转翼与拍动翼气动力特性的比较 [J]. 航空学报, 2007, 28(2): 286-289.
LAN Shilong, SUN Mao. Aerodynamic performance comparison between micro revolving wing and flapping wing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(2): 286-289. (in Chinese)
- [8] 董强,张西金,赵宁,等. 蝉翅翼的运动研究与三维数值分析 [J]. 航空动力学报, 2015, 30(3): 588-594.

DUN Qiang,ZHANG Xijin,ZHAO Ning,et al. Movement research and three-dimensional numerical analysis on cicada's wing[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(3):588-594. (in Chinese)

[9] 朱建阳,蒋林,雷斌. 三维仿生悬停扑翼的时间非对称扑气动特性[J]. 航空动力学报,2017,32(4):858-864.

ZHU Jianyang,JIANG Lin,LEI Bin. Aerodynamic performance of time asymmetric flapping of a three-dimensional flapping hovering bionic wing[J]. Journal of Aerospace Power,2017(4):858-864. (in Chinese)

[10] MACAN T T. Biology of dragonflies[J]. Journal of Animal Ecology,1960,29(2):404-405.

[11] WARE J. Dragonflies and damselflies of south Africa[J]. Quarterly Review of Biology,2009,84(2):209-210.

[12] WAKELING J M,ELLINGTON C P. Dragonfly flight I : gliding flight and steady-state aerodynamic forces [J]. Journal of Experimental Biology,1997,200(3):543-556.

[13] WAKELING J M,ELLINGTON C P. Dragonfly flight II : velocities,accelerations and kinematics of flapping flight[J]. Journal of Experimental Biology,1997,200(3):557-582.

[14] WAKELING J M,ELLINGTON C P. Dragonfly flight III : lift and power requirements[J]. Journal of Experimental Biology,1997,200(3):583-600.

[15] WANG H. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies[J]. Journal of Experimental Biology,2003,206(4):745-757.

[16] HENDRICKS D. An integrated analysis of a dragonfly in free flight[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2015,43(1):467-499.

[17] 高倩,郑孟宗,李志平,等. 蜻蜓爬升过程飞行特征实验研究[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(6):1271-1278.

GAO Qian,ZHENG Mengzong,LI Zhiping,et al. The experimental study on flight performance of dragonfly during climb-ing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2016,42(6):1271-1278. (in Chinese)

[18] SUN Mao,LAN Shilong. A computational study of the aero-dynamic forces and power requirements of dragonfly (aeshna juncea) hovering[J]. Journal of Experimental Biology,2004,207(11):1887-1901.

[19] 张锐,周超英,汪超,等. 蜻蜓非对称扑动时的气动特性[J]. 航空学报,2017,38(12):101-113.

ZHANG Rui,ZHOU Chaoying,WANG Chao,et al. Aerodynamic characteristics of dragonfly in asymmetric flapping[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2017,38(12):101-113. (in Chinese)

[20] 孟令兵,昂海松,肖天航. 基于 CFD/CSD 方法的蜻蜓柔性翼气动特性分析[J]. 航空动力学报,2014,29(9):2063-2069.

MENG Lingbing,ANG Haidong,XIAO Tianhang. Analysis of aerodynamic characteristics of flexible wing of dragonfly based on CFD/CSD method[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(9):2063-2069. (in Chinese)

[21] DE CROON G,DE CLERCQ K M E,RUIJSINK R,et al. Design,aerodynamics,and vision-based control of the delfly[J]. International Journal of Micro Air Vehicles,2009,1(2):71-97.

[22] SEND W,FISCHER M,JEBENS K,et al. Artificial hinged-wing bird with active torsion and partially linear kinematics [R]. Brisbane, Australia: 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS),2012.

[23] KORNBLUH R. Project mentor:biologically inspired platform[R]. Bellevue,WA,US:Keynote Presentation at the 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference,2002.

[24] SUNADA S. Performance of a butterfly in take-off flight [J]. Journal of Experimental Biology,1993,183(4):249-277.

[25] POND C M. The initiation of flight in unrestrained locusts, Schistocerca gregaria [J]. Journal of Comparative Physiology,1972,80(2):163-178.

[26] 陈茂伟,孙茂. 蜂蝇快速起飞过程的实验观测及力学分析[J]. 航空学报,2014,35(12):3222-3231.

CHEN Maowei,SUN Mao. Experimental measurement and force analysis of a fast takeoff in dronefly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2014,35(12):3222-3231. (in Chinese)

(编辑:叶 青)