

分类号_____

密级_____

学校代码 80149

UDC _____

编号_____

学号 200328014904281

中国科学院研究生院

硕士学位论文

昆虫飞行轨迹测量及模拟

赵创新

指导教师 徐进良 研究员 博士 中国科学院广州能源研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 工程热物理

论文提交日期 2006-05 论文答辩日期 2006-06

培养单位 中国科学院广州能源研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____

摘 要

本文从昆虫活体自由飞行光学测量, 基于有限容积法的 N-S 方程数值求解, 以及建立机械模型翅膀测量流畅结构三个方面对昆虫飞行的空间运动轨迹和排动模式及其引起的气动参数和流畅结构不同作了研究。

(1) 研究昆虫飞行的三维空间运动参数需要对二维图像进行重构来实现, 传统的重构方法是采用两个或者多个相机从不同角度拍摄以获得同时刻不同角度的图像。本文介绍了一种采用单一相机完成三维重构的方法。通过在单相机镜头前面附加四块两两平行的平面镜组来获得三维信息, 该装置可以在同一照片上获得物体两个角度的观察图像, 等效于用两个高速摄影仪对昆虫的飞行进行拍摄。分别标定出每个等效摄像机的参数, 根据机器视觉原理进行三维重构。实现了用单个相机完成昆虫自由飞行状态的翅膀三维参数重构过程, 避免采用多个相机的需要增加复杂同步电路以及引起的高额费用, 同事也克服了过去基于单相机的三维重构需要增加某些假设所引起的与真实飞行的差异。

(2) 通过数值求解 N-S 方程研究了在不同拍动轨迹下的蜻蜓翅膀所受的气动力, 对比了直线拍动、椭圆拍动、“8”字拍动和双“8”下的受力特性。结果表明不同拍动轨迹下升阻力曲线的一个共同特征: 下拍阶段主要提供升力, 上提阶段主要提供推力; 几种拍动轨迹下的最大升力系数峰值都超过了 5, “8”字和双“8”字拍动甚至超过了 6, 远远超过稳态下的最大升力值 1; 相对于直线拍动轨迹(无横向偏移量), 椭圆型轨迹和双“8”字型轨迹均导致升力的降低, 而“8”字型拍动轨迹下的升力和推力却得到明显提高。

(3) 通过对模型在不同的转动轴位置下旋转引起的流畅结构变化的 PIV 处理, 证实了数值计算的结果

关键词: 昆虫, 流体力学, 光学测量, 数值模拟

Abstract

The mechanism of insects flying was studied in this paper from flapping path, numerical simulation and mechanical model wings.

Studying 3D dynamic parameter of insect flight requires reconstructing from 2D image, and two or more cameras have been used to capture images from different angle at the same time in conventional method. In this paper, a new method has been introduced. By adding a special device that made of four plane mirrors onto a high speed camera, two different images were projected on the same frame, which is equivalent to obtained using two different cameras. Though calibrate the two optical paths, the external and intrinsic parameters can be computed. Then reconstruct the 3D information of fly's wings by using the mechanism of machine vision.

This paper simulated the dynamics of three different kinds of flapping path of dragonfly, and contrasted linear, elliptical, figure '8' and figure double '8' flapping path. The result shown that there are similar characters between lift and drag curve, which provide life during down stroke and thrust during upstroke. All the maximal lift efficiency are larger than 5, even larger than 6. It is far from the maximum of steady flow. Elliptical and figure double '8' flapping path make the lift decrease, but the lift and thrust of figure '8' are both increased in figure during '8' flapping. It is helpful for providing suggestions to design micro air vehicle.

At the same time, a mechanical model was fabricated to finish PIV experiment, the velocity contour around wings was computed to compare with the simulation result, these result fit each other well.

Keyword: Insect, fluid dynamics, optical measure, numerical simulation

目 录

摘 要.....	II
Abstract.....	II
目 录.....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 引 言.....	1
1.2 活体实验.....	2
1.2.1 形态参数测量.....	2
1.2.2 活体流场观测.....	5
1.3 模型实验.....	7
1.3.1 量纲分析.....	7
1.3.2 模型流场观测.....	8
1.4 活体模型结合.....	11
1.5 结 论.....	13
1.6 本课题的研究内容.....	13
第二章 活体自由飞行参数的观测.....	19
2.1 引 言.....	19
2.2 实验装置与方法.....	20
2.2.1 实验活体.....	20
2.2.2 实验装置及原理.....	21
2.2.3 相机模型.....	22
2.2.4 相机标定以及三维重构.....	27
2.2.5 特征点识别.....	29

2.3 结果和讨论.....	30
2.3.1 图像分析.....	30
2.3.2 轮廓识别.....	31
2.3.3 误差分析.....	32
2.3.4 与两个相机的比较.....	34
2.3.5 转弯过程两翅膀拍动频率.....	34
2.3.6 运动图像.....	35
2.3.7 翅膀尖运动轨迹.....	36
2.3.8 振幅.....	38
2.3.9 翅膀不对称拍动分析.....	39
2.4 结论.....	40
第三章 数值模拟.....	43
3.1 引言.....	43
3.2 问题描述.....	44
3.3 控制方程及求解.....	47
3.4 初始条件和边界条件.....	49
3.5 计算可信性验证.....	49
3.6 结果与讨论.....	51
3.6.1 一个典型算例的分析.....	51
3.6.2 几种主要参数对升阻力特性的影响.....	58
3.7 结论.....	75
第四章 PIV 实验模拟.....	79
4.1 引言.....	79
4.2 实验原理及系统.....	80
4.2.1 PIV 测量原理.....	80

目 录

4.2.2 PIV 系统构成	81
4.2.3 实验系统.....	85
4.3 实验结果.....	86
4.3.1 转轴的影响.....	86
4.3.2 有滞留时间时的转轴影响影响.....	90
4.4 结论.....	93
附录 I: 硕士研究生期间发表文章	95
致 谢.....	96

第一章 绪论

1.1 引言

扑翼飞行是自然界中昆虫普遍采用的飞行模式,约有数百万种昆虫采用扑翼飞行^[1],昆虫是自然界出现最早,体积最小的飞行者,在经历了1.5亿多年的进化历程后^[2],昆虫具备高超的飞行技巧,飞行使其可以在较大的范围内捕捉食物,并随季节迁移。许多昆虫可以在较短的时间内完成复杂的飞行动作,甚至利用空中的飞行特技来捕捉猎物或进行交配等^[3]。

近百年来,对于昆虫如何控制飞行动作来达到如此高超的飞行技巧,科学家们致力于通过研究昆虫翅膀的拍动轨迹、拍动频率、翅膀周围空气流场结构以及其翅膀尺度和能量消耗等来揭示其飞行的空气动力学原理。特别是由于近年来MAV(Micro Air Vehicle)概念的提出,更加有力地推动了昆虫飞行中流体力学问题的研究。特别是MAV在未来军、民两方面均有广阔的应用前景,近年来科学家们通过揭示昆虫的飞行机理来为MAV的设计提供理论依据。

昆虫飞行时翅膀的Re数很小,大约在 10^2 - 10^4 之间^[4],甚至更小,将其翅膀在风洞的定常来流条件下进行实验,结果表明在此Re数范围产生的升力能力很低,例如果蝇翅膀的最大升力系数 C_L 只有约0.6^[5],蜻蜓的只有约1.0^[6],这不能平衡昆虫的自身重量,更不能提供机动飞行的附加气动力,显然昆虫是利用非定常流来实现高升力的^[7],研究与MAV同尺度的昆虫的飞行机制具有着重要的意义。

对昆虫飞行机理的实验研究有活体实验、模型实验和活体模型并用三种方法。活体实验能够真实地反映昆虫飞行动作模式,通过测量运动形态学参数来研究其飞行规律,所以采用活体实验最能反映客观的飞行过程。但是由于活体的飞行动作随机性很大,控制显得不方便,实验操作难度也较大。模型实验是建立在

观察活体的基础上，它具有再现性及可测量参数多的优点，是普遍采用的一种方法，但模型反应的流场结构与真实的流场存在一定的差距。如果将模型和活体实验两者有机地结合起来，可以更为准确地描述昆虫的飞行状态。

1.2 活体实验

1.2.1 形态参数测量

由于昆虫小尺度，高频率拍击翅膀，通常很难量化其自由飞行过程，例如像普通果蝇的平均尺度大约为 2-3mm，翅膀拍击频率为 200Hz^[8]。再者，昆虫不能按照人的意志去实现飞行动作。在早期的研究中，人们为了获得飞行参数，将昆虫捆绑起来，采用高速摄影分析了包括双翅目昆虫和直翅目昆虫的飞行过程^[9]，后来逐渐开始定量研究翅膀的拍动频率和翅尖的运动轨迹，并开展了对自由飞行昆虫可视化流场的研究。

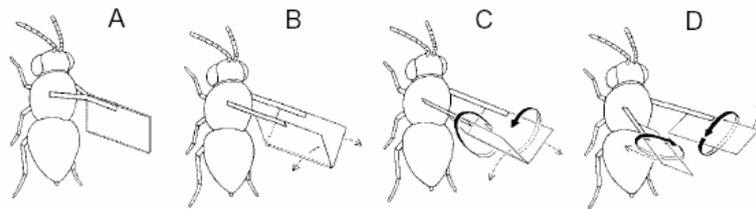


图 1.1 小黄蜂(*Encarsia Formosa*)的 Weis-Fogh 机制^[21]

Fig.1.1 Weis-Fogh clap and fling mechanism illustrated on an *Encarsia Formosa*. From Ellington^[21].

Weis-Fogh^[4]对昆虫飞行机理作了较早的报道，通过对小黄蜂(*Encarsia formosa*)飞行的研究，发现其具有不同于鸟类产生升力的振翅运动形式、启动速度比鸟类快，并提出了 *clap-fling* 机制(也称为 *Weis-Fogh* 机制)，即紧靠在背部的翅膀在前缘绕后缘快速打开的过程中能够产生瞬时的高升力。与普通机翼产生升力相比，它不存在 *Wagner* 效应(升力产生滞后现象)，具有很好的机动性能和启动性能。这种飞行机制在后来的系列文献报道^[10-20]中得到了证实，这是最早提出

的昆虫高升力机理，图 1 为小黄蜂的利用 Weis-Fogh 机制拍动产生高升力的示意图。

早期对于活体昆虫的飞行研究，多数是对捆绑昆虫的飞行状态参数进行测量的。由于捆绑的限制作用，使其与自由飞行存在一定的差距。*Bakerd* 等^[22]的研究表明自由飞行的蚱蜢拍打频率比捆绑的大 16%；*Kutsch* 和 *Stevenson*^[23]的工作也表明被捆绑的拍击频率比自由飞行的小，这说明对自由飞行参数的研究可以避免由于捆绑引起的各种限制。如何实现在昆虫自由飞行状态下的实时观察是科学家们一直努力的方向，在众多研究中较为突出的是 *Dudley* 和 *Ellington*^[24,25]利用昆虫对光线的敏感性(紫外光可以刺激大黄蜂启动并持续飞行)，采用斜旋转条纹引导大黄蜂作定向飞行，采用高速摄影获得了不同风速下的自由前飞动作。飞行速度通过调节风洞的风速来控制，并基于前飞过程的两翅膀拍动对称的假设下研究前飞过程的运动学参数，包括翅尖的轨迹，身体倾角，展向攻角，拍动角，拍动结束时的旋转角等，然后在此基础上计算了自由前飞过程的升力和功率消耗等一系列参数。

Dudley 和 *Ellington*^[24,25]采用单个高速摄像机进行拍摄，并假设前飞过程两个翅膀的拍动呈对称模式。基于这个假设计算三维空间的翅膀参数，然而实际的前飞过程很难保证对称拍动，所以这种假设与真实的飞行还存在一定的差距。由于昆虫飞行的随意性，通常难以准确描述其空间位置，以及拍摄需要较大的视场，采用多个摄像机受到限制。基于此逐步发展起来一些基于单个相机的测量方法，*Ellington*^[15]详细描述在单个相机情况下的三维重构方法；*Dudley* 和 *Ellington*^[23]基于倾斜摄像机和飞行对称的前提下测量了三维参数；*Willmott* 和 *Ellington*^[26]报道了采用单个摄像机的三维重构的几种方法。然而单个相机不能反映深度信息，根据视觉原理，至少需要两个同时刻的观测图像才可以完成三维重构，因而两个甚至三个相机被用到测量实验中。

Wakeling 和 Ellington^[27,28]采用两个相互垂直的相机拍摄了自由滑行的蜻蜓，重构其飞行轨迹等参数，并假设空气是定常流动然后计算得其翅膀的升阻力；Willmott 和 Ellington^[29]用两个摄像机拍摄了一雄两雌三只天蛾(Manduca Sexta)从悬停到前飞速度为 5m/s 的过程，结果表明前飞速度提高时拍击平面角(拍击平面与水平面的夹角)逐渐增大，体角(身体前后端的连线与水平面的夹角)的逐渐减小。他们同时还给出了翅膀的扭转以及翅尖的拍动角，计算了悬停和前飞过程的平均升力系数，对由于性别不同，体形不同带来的力、能量消耗等问题作了量化的分析。多个相机的三维重构技术给研究人员提供了三维的空间信息，逐渐发现一些新的现象，同时也提出了一些新的飞行机理。

在对飞行参数的测量研究中，也有其他的方法，例如 Schilstra 和 Van Hateren^[30,31]将一种丽蝇(Blowfly)置于箱体内部，采用一种称为修正探测线圈技术(modified search coil technique)即在其身上加传感线圈，通过线圈与周围的变频线圈之间的磁场作用来记录其身体的倾斜(pitch)、扭转(roll)和偏航(Yaw)在自由飞行状态下的变化情况。测量的飞行速度达到 1.2m/s，垂直方向、水平方向的加速度分别达到 10m/s^2 和 20m/s^2 ，最大角速度达到 $2000^\circ \text{ s}^{-1}$ ，最大角加速度甚至达到 $10^5^\circ \text{ s}^{-2}$ ，实现了自由飞行的测量。王浩等^[32]、以及曾理江等^{[33][34]}报道的投影梳装条纹插值法也是一种成熟的非接触测量方法，他们测量了自由飞行蜻蜓翅膀拍动的许多参数，并测量翅膀变形，给出了高精度的自由飞行翅膀变形测量方法，为研究翅膀柔性变形对流场结构和稳定性影响提供了基本测量数据。同时也是一种非接触的自由飞行测量方法。

以上的测量多是对悬停或前飞过程的飞行参数的测量，真实的飞行过程多数是机动状态，机动飞行是最常见的、最复杂的飞行模式，直到近来，Fry 等^[35]采用三个摄像机观察了自由飞行果蝇的急速转弯过程才在真正意义上实现了机动飞行的参数测量，给出了急速转弯过程中两翅膀不对称的运动数据。

以上这些的测量方法已经基本满足了对飞行昆虫翅膀参数的测量要求, 并已经能够测量出不同的昆虫的不同飞行状态下的形态学参数。

1.2.2 活体流场观测

昆虫飞行的气动力来源于空气对其翅膀的反作用力, 由于翅膀的拍动所引起翅膀周围空气流场结构也就深受关注。翅膀的运动带动产生了涡, 有前缘涡, 尾迹涡等。人们较为感兴趣的是涡的形成过程、在整个拍动过程的发展情况以及三维空间结构。非接触测量的 DPIV(Digital Particle Image Velocimetry)技术在流场定量测量方面得到了广泛的应用, 对流场结构和动力学性能研究起了重要的作用。

在昆虫进化过程中, 一些昆虫的后翅开始逐渐退化变小, 甚至后面两翅膀不再有飞行能力。为了观察由于形态学上的不同所引起流场结构的不同, Grodnitsky 和 Morozov^[36]在上世纪 90 年代采用流场可视化的方法重构了捆绑飞行的绿草蜻蛉(green lacewing)的翅膀在拍击过程中的流场结构, 该昆虫有四个分开的翅膀, 可以交互拍击。随后他们又采用同样的方法报道了捆绑的蝴蝶等六种昆虫的尾迹涡结构, 并给出了形态学上不同的昆虫飞行所引起的流场结构^[37]。然而, 对昆虫飞行的流场观察并给出非定常机理解释最早的是 Ellington 等^[38]对活体和三维模型的可视化观察, 他们观察到了下拍过程中强烈的前缘涡在几个弦长的飞行中并没有脱落, 认为是由于动态失速而不是过去所认为旋转产生的涡, 沿展向的速度梯度稳定了前缘涡。但是, Ellington 对活体的流场观察没有能够清晰地反映出流场特征, 不得不借助于模型来复现流场。随后 Willmott^[39]报道了用立体摄像和高速摄影重构观察了捆绑的天蛾(Manduca Sexta)在不同飞行速度下的流场变化, 观察显示前缘涡随着飞行速度的提高逐渐增大, 后缘涡在上挥接近结束的时候形成的微小射流提供了推力。

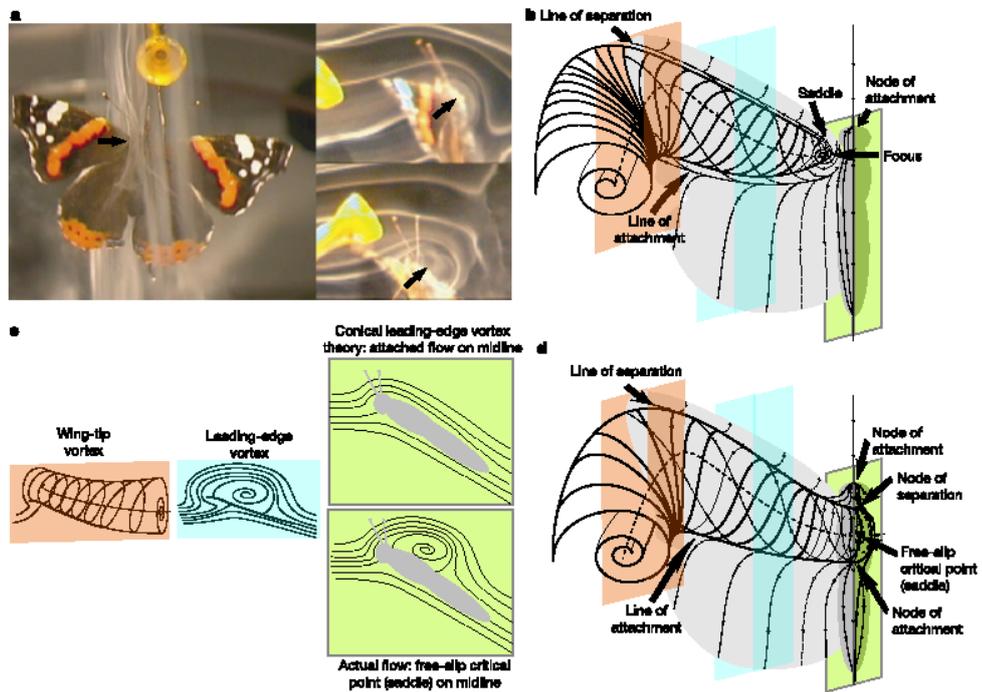


图 1.2 蝴蝶自由飞行流场结构^[40]

Fig1.2. Smoke-wire visualized flow of free-flying butterfly. From Srygley and Thomas^[40]

Srygley 和 Thomas^[40] 通过训练一种称为红将军的蝴蝶(*Vanessa atalanta*)在风洞中由人造花朵吸引来进行自由飞行分析, 利用烟气可视化获得其翅膀周围的流场图像, 实验表明, 自由飞行的蝴蝶利用一系列的非定常激励来产生升力。如: 尾迹捕获、旋转升力机制、Weis—Fogh 机制等, 飞行过程中似乎没有一种定型的飞行模式, 而是不时地在各种机制之间来调整变换。才真正实现了对活体自由飞行流场的结构的观测, 并解释其飞行过程所依靠的飞行机制。此前并没有文献解释旋转升力机制和尾迹捕获的关系。尽管一些文献^[38,41,42]报道了基于拍动模型的前缘涡结构, 但是他们却有一定的差异, 对流场可视化实验^[38,39]虽然观察到了前缘涡, 但是却没能描述涡的内部结构, 此外, 捆绑也不能反映其真实的飞行状态。Srygley 和 Thomas^[40]采用了多个相机从不同角度拍摄, 重构出自由飞行蝴蝶的三维立体非定常流场结构, 得到的照片清晰地显示出与过去文献报道^[38,41,42]所不同的流畅结构, 如图 2 所示。

Thomas 等^[43]对自由飞行蜻蜓的非定常流场结构作了可视化分析，活体实验表明，蜻蜓模型所反映的拍动动作和流场难以实现活体所具有的自然性和随机性。实现自由飞行测量成为最为理想的测量途径，同时也是测量发展的趋势。

活体的流场可视化清晰地反映了昆虫翅膀周围的流场结构，DPIV 技术的应用量化了流场，但活体实验不仅控制难度较大，同时实验重复性较差，加上昆虫飞行的自由性使得飞行状态难以确定。而模型实验则可以完成活体所缺少的这些方面，同时可以对流场的动力学参数进行测量。

1.3 模型实验

1.3.1 量纲分析

相似理论作为模化实验的理论基础，提供了模型设计方法。两个相似的现象具有相同的无量纲准则数，所以通过在相同无量纲准则数下用模型来重现模拟活体飞行的流场，可实现其动力学参数的测量，进而对活体的飞行作出预测和分析。

量纲分析理论的原理是在因变量和自变量之间建立函数关系，通过把各个量无量纲化来得到无量纲数，只要保证模型和活体的无量纲数一致就可以得到模型和活体的相似现象，图 3 给出部分参数。影响扑翼动力 F 的量有：流体的密度 ρ ，流体的粘性系数 μ ，流体与昆虫的相对速度 u ，翅膀攻角 α ，翼展 l ，平均弦长 \bar{b} ，振幅 A ，拍击频率 f 。记函数 $F = \phi(\rho, \mu, u, l, \bar{b}, A, \alpha, f)$ 为气动力和各个变量量之间的关系，选取 ρ ， \bar{b} ， u 为基本量对方程进行无量纲化如下：

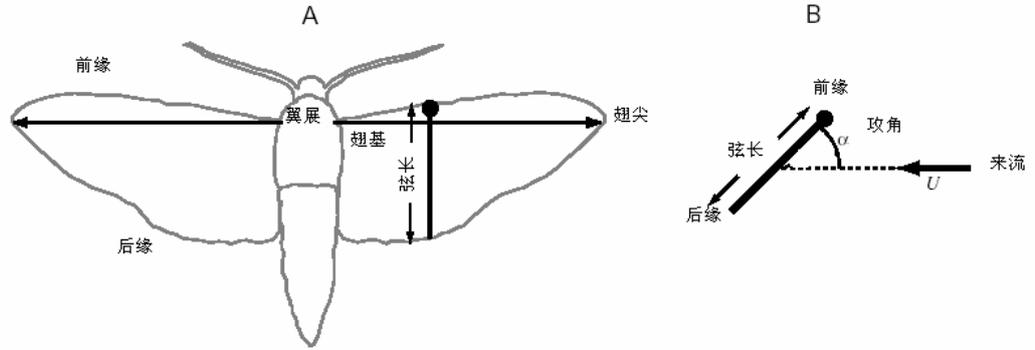


图 1.3 昆虫翅膀的几何参数^[8]

Fig1.3 Parameter of insect body . From Sane[8]

$$\frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2 \bar{b}} = g\left(\frac{\mu}{\rho \bar{b} u}, \frac{l}{\bar{b}}, \frac{A}{\bar{b}}, \alpha, \frac{f \bar{b}}{u}\right) \quad (1.1)$$

记 $C = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2 \bar{b}}$, (1)可以变形为

$$C = g\left(\frac{1}{\text{Re}}, \frac{l}{\bar{b}}, \frac{A}{\bar{b}}, \alpha, \text{St}\right) \quad (1.2)$$

这里: C 为气动力系数(可以是升力也可以是阻力系数); $\frac{l}{\bar{b}}$ 是展弦比,表征翅

膀的几何特征; $\frac{A}{\bar{b}}$ 表征拍动角; Re 数表征惯性力与粘性力的比值; St 表征弹性

力和惯性力的比; 所以只须保证 Re 数, 展弦比, 拍动角, 攻角, St 数这五个无量纲数相等, 就可以利用模型来模化活体的飞行, 并进行各个参数的测量。

1.3.2 模型流场观测

测量气动力在翅膀拍动过程中随时间的依变关系较为困难, 尽管早期有实验

在活体上测量,但是测量的是身体上的受力,而不是翅膀,这就很难区分身体惯性力和翅膀的气动力^[8]。模型实验可以通过在模型上布置传感器来测量所感兴趣的参数,同时模型的可重复性也是活体所不能相比,模型研究得到了广泛的应用。在 Weis-Fogh^[4]机理提出后, Lightill^[10]就通过一个简化的刚性模型,对两个翼板旋转张开一分开一闭合诸过程进行模拟,并根据二维势流理论作出了理论分析,认为在昆虫两翼在上挥(*upstroke*)结束时候在背部拍击(*clap*)靠在一起然后快速打开,打开过程中翅膀的前缘绕后缘转动张开,空气被吸入两翅之间,流体在填充时产生非常高的速度,使得翅面上方的空气流速度加大,下面的变小,根据 *Bernolli* 定理在上下翅面形成压力差可以产生升力,并用模型来解释高升力机制。Savage 等^[42]在基于测量的蜻蜓飞行数据用模型实验,解释了小黄蜂的高升力机制。后来, Maxworthy^[11]通过刚性机构实验,证实了 Weis-Fogh 和 Lightill 的一些基本提法,同时指出两翼张开是产生前缘涡的重要作用,前缘涡导致产生更大的升力被 Haussling^[12]以及 Edwards 和 Chang^[13]等的计算所证实。Speeding 和 Maxworthy^[20]的实验再次验证了 Weis-Fogh 机理,实验采用两个电机驱动的有机玻璃翼片,并且在水中加了聚苯乙烯粒子采用录像机拍摄了流场的变化。通过可视化流场观察和瞬时升力的测定,进一步验证 Weis-Fogh 机构的平均升力系数高达 7-8。模型试验对 Weis-Fogh 机制的成功解释,以及它的可重复性、易测量性能、加上流场结构的清晰显示使得越来越多的研究工作借助于模型试验来验证。

由于只有部分昆虫的飞行依靠 Weis-Fogh 机制,单单依靠 Weis-Fogh 机制还不能解释其他昆虫的复杂飞行机制,后来的研究开始基于活体观察的飞行动作来建立模型试验,研究不同飞行模式下的流场结构, Savage^[44]等的模型所作出蜻蜓的特殊飞行姿态机理(升力峰和翅膀旋转的关系)也为后来的试验所证实 (Dickinson 等^[41], Sane 和 Dickinson^[45])。在对于蜻蜓和豆娘的研究中考虑了沿着展向空间和瞬时的诱导速度,以及基于尾迹的环量估计校正,也获得一定的成功 (Azuma 等^[46], Azuma 和 watanable^[47], Sato 和 Azuma^[48])。

早期对昆虫模型分析研究限制在远场尾迹而非翅膀近场区域的流动现象, 尽管这样的远场模型不能计算翅膀的瞬时升力, 但是提供了平均升力和能量需求。Ellington^[8]的‘漩涡模型’, 可以用流体动量变化平衡体重来估计悬停所需要的平均升力。随后, Ellington^[38], VanDenberg 和 Willomott^[49,50]的研究对三维机械翅拍动过程的流场观察得到了与前人工作的不同结果, 发现前缘涡稳定附着在翅面上。他们在模型翅上观察到的前缘涡与用活体试验的流场结构吻合很好, 然后对机械翅拍动过程产生的前缘涡, 翅尖涡的脱落等作了详细的研究, 从漩涡产生的三维尺度变化, 以及从翅基到翅尖的展向流动对前缘涡的影响和沿着翼展方向的涡的空间结构等方面给出了三维测量参数。重构了翅膀拍动过程的三维流场空间运动结构, 提出展向流动使得前缘涡的附着时间延长, 动态失速机制是天蛾悬停过程的升力机制。后来 Tytell 和 Ellington^[51]制作了一个可以产生类似天蛾尾迹涡环的活塞, 并假设天蛾在悬停时候只由下拍提供力来支撑体重, 由一个活塞和套管来产生涡环, 涡环的大小和频率与文献中报道的天蛾翅膀拍击频率一样, 使用 PIV 技术来分析流场结构, 结果显示人造涡环的发展经过了三个阶段, 给出了由最初的层流涡环逐渐过渡到湍流整个过程的涡环的变化, 并给出了受力估计和校正方法。

在非稳态机理研究中, 一个较难的问题是如何直接测量拍动翼上产生的力, 为了进一步探索昆虫飞行的空气动力学机制, Dickinson 等^[41]制作了一个由六个电机驱动的果蝇模型测量了气动力随时间的变化关系。机械翅在每次划动开始和结束时气动力均产生瞬时升力峰, 延迟失速不能解释这一现象, 这种力的峰值出现在翅减慢且迅速旋转的时候, 认为延迟失速、旋转环量、尾迹捕获三种机理在构成飞行的主要机理, 图 4 给出了这三种机理。延迟失速在拍动的平动时刻起作用, 翅膀以大攻角在空气中掠过是尾迹捕获机制起作用。旋转环量和尾迹捕获分别在翅膀的快速旋转和改变方向的时候起作用, 通过旋转升力, 昆虫可以调节机动飞行的方向和飞行力的大小。

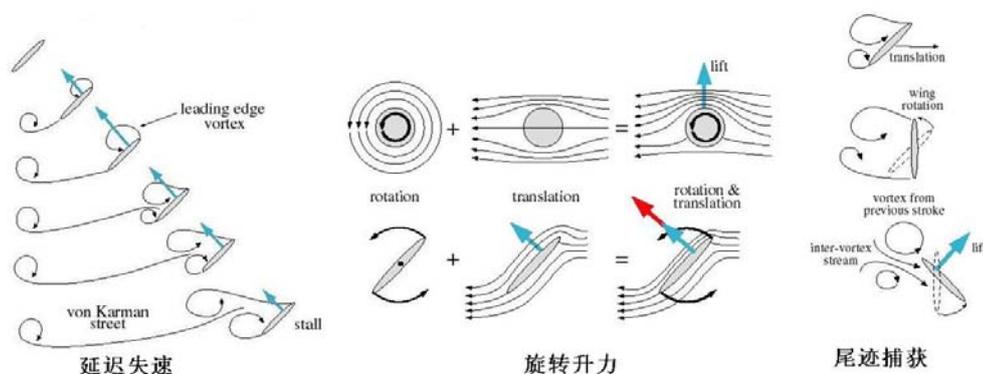
图 1.4.延迟失速、旋转升力和尾迹捕获机制^[52]

Fig1.4 Mechanism of delay stall, rotational lift and wake capture. From[52]

近来的一些研究工作表明在准稳态模型与悬停飞行中的昆虫翅膀产生的瞬时升力基本接近,但是对于这一方法是否可以扩展到前飞却还不清楚。Dickson^[52]利用果蝇的比例模型研究其翅膀以定角速度旋转同时以适当的速度前飞过程,提出对准定常模型做出修正后可以对前飞过程升力进行测量。

对于四翅膀的昆虫如蜻蜓前后翅膀的影响,以前的报道^[54,55,56]已给出了活体以及模型测量数据,由于四个翅膀的自由拍动,其交互性影响一直受到关注。孙茂和兰世隆^[57]基于 CFD 的数值计算结果表明,前后的翅膀的交互性影响不大,最近 Maybury 和 Lehmann^[58]采用蜻蜓模型研究了前后翅的影响,实验证实了过去文献^[7,58,59]中前翅对后翅的影响很小的说法。

由于模型实验的可再现性和易测量性较好,可以对活体的观察结果给予验证,所以应用较为广泛。但是由于模型实验往往是基于别人的活体实验数据,容易在一些细节上忽略或者模型没能完全反映出活体的流场特征,导致模型与活体的流场结构差异较大,一些研究人员开始将活体实验和模型实验一起来研究。

1.4 活体模型结合

同时对活体和模型进行实验较为突出的一个例子是 Ellington 等^[38]通过将天

蛾(*Manduca sexta*)拴在风洞中进行实验,用烟丝法观察天蛾翅膀拍击过程引起的流场结构变化。由于天蛾的尺寸太小,且飞行动作不规则,同时活体的流场可视化图片不够清晰,不能获得翅膀附近的流场结构。基于此,根据天蛾的尺寸,制造了一个按比例放大的三维的机械模型,通过计算机来控制模型翅膀的拍动。活体和模型观察结果表明:当两翼张开时候,在下拍开始时出现前缘涡,并持续到下拍结束。下拍过程中涡不断增大,并朝翅尖方向移动。前缘涡一直稳定地附着在翅面直到完成了下拍一半以后,发现了前缘涡的稳定附着的一个高升力机制,图 1.5 是活体和模型的可视化流场图。

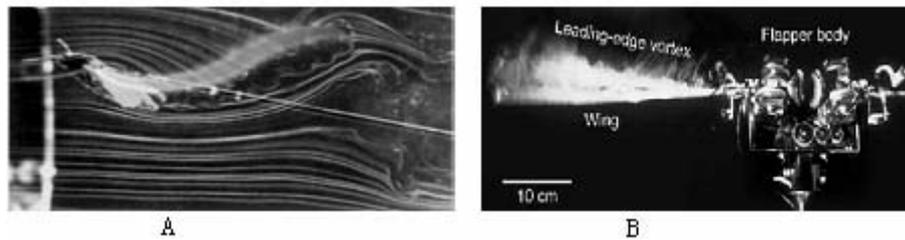


图 1.5 活体实验和模型的可视化流场

Fig.1.5 The visualized fluid of real insect and model experiment

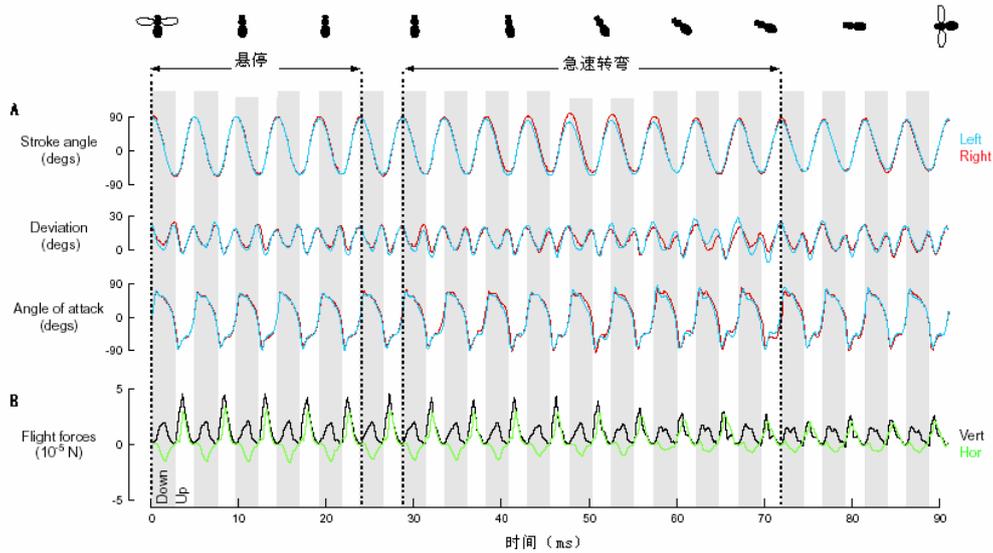


图 1.6 急速转弯活体形态学参数和模型动力学参数测量对照^[35]

Fig1.6 Comparison between morphologic and dynamic parameter. Form Fry[35]

Fry 等^[35]对果蝇自由飞行的转弯过程作了研究，他们采用三个相机观察重构了果蝇活体急速转弯过程两翅膀三维空间拍动参数，然后基于此，建立模型并测量了模型的受力，提出了转弯过程的是惯性力而不是粘性力起主导作用，首先给出了机动飞行的运动学参数和动力学参数对比分析结果，如图 1.6 所示。

同时采用模型和活体研究可以进行对比分析，通常可以提供更为准确现象描述，揭示其中的机理，然而这样的实验难度较大，周期较长。

1.5 结论

活体、模型和模型活体同时使用的研究方法在研究昆虫飞行的过程中都起到了不同的作用。目前的测试方法已经可以完成各种飞行姿态的测量，同时 DPIV 技术也可以为模型实验提供很好的量化结果。Weis—Fogh 机制、旋转升力机制、动态失速机制等都得到了很好的验证。

但是目前对机动飞行的参数测量数据仍然不多，如起飞，降落或翻跟头等复杂的飞行动作过程需要进一步研究并揭示其中的机理。另外对于昆虫的飞行稳定性机理也需要进一步研究，这对今后设计 MAV 的机动飞行平衡性能有很好的帮助。也可以揭示在长期进化过程中的适应能力。这就需要综合考虑对活体控制，模型设计做进一步的研究以求尽量准确反映现象。

1.6 本课题的研究内容

基于以上的讨论，本论文从一下一个方面着手进行研究。

- (1) 观察活体自由飞行规律，重构飞行参数。
- (2) 采用数值模拟研究飞行轨迹对气动力的影响。
- (3) 用机械模型模拟翅膀参数对流场结构影响

参考文献

- [1] Ho S., Nassef H., Pornsinsirak N., Tai Y C., et al. Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39: 635-681.
- [2] Shyy W., Berg M., Ljungqvist D. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 1999, 35: 455-505.
- [3] Michael Dickinson. 刘映红译. 昆虫飞行的奥秘. *科学*, 2001, 9 :31-37.
- [4] Weis-Fogh T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals including novel mechanism for lift production. *J Exp Biol*, 1973, 59: 169-230.
- [5] Vogel S. Flight in *Drosophila*. III. Aerodynamic characteristics of fly wings and wing models. *J Exp Biol*, 1967, 44: 431-443
- [6] Wakeling J M., Ellington C P. Dragonfly flight I. Gliding flight and steady-state aerodynamic forces. *J.Exp.Biol*, 1997,200: 543-556,
- [7] 孙茂. 昆虫飞行的高升力机理. *力学进展* 2002, 32:425-434.
- [8] Sane S P. The aerodynamics of insect flight. *J Exp Biol*, 2003,206: 4191-4208.
- [9] Willmott A P, Ellington C P. Measuring the attack of beating insect wings: Robust three-dimensional reconstruction from two-dimensional images. *J Exp Biol*, 1997, 200: 2693-2704.
- [10] Lightill M.J. on the Weis-Fogh mechanism of lift Generation. *J Fluid Mech*, 1973, 60:1-17.
- [11] Maxworthy T. Experiments on the Weis-Fogh Mechanism of Lift Generation by Insects in Hovering. I.Dynamics of the Fling. *J Fluid Mech*, 1979, 93:47-63.
- [12] Haussling H J. Boundary-fitted coordinates for accurate numerical solution of multibody flow problems. *J Comp Physics*, 1979,30:107-124.
- [13] Edwards R H, Cheng H K. The separation vortex in the Weis-Fogh circulation-generation mechanism. *J Fluid Mech*, 1986,165:247-272.
- [14] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis. *Phil.*

- Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305: 1-15.
- [15] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305: 17-40.
- [16] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305: 41-78.
- [17] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamic mechanisms. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305: 79-113.
- [18] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. V. A vortex theory. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305: 115-144.
- [19] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. VI. Lift and power requirements. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 1984, 305: 45-181.
- [20] Spedding G R., Maxworthy, T. The Generation of circulation and lift in rigid two-dimensional fling. J Fluid Mech, 1986, 165:247-272
- [21] Ellington C P. The novel aerodynamics of insect flight: application to micro-air vehicles. J Exp Biol, 1999, 202:3439-3448
- [22] Baker P S, Gewecke M., Cooter R J. The natural flight of the migratory locust, *Locusta migratoria* L.III. Wingbeat frequency, Flight speed and attitude. J. comp. Physiol. 1981,A 141:233-237
- [23]Kutsch W., Stevenson P. Time-correlated flight of juvenile and mature locusts: a comparison between free and tethered animals. J Insect Physiol. 1981,27:455-459
- [24] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumblebees. I. Kinematics and morphology. J Exp Biol., 1990, 148: 19-52
- [25] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumblebees. II. Quasi-steady lift and power requirements. J Exp Biol, 1990,148:53-88
- [26] Willmott A P, Ellington C P. Measuring the angle of attack of veating insect wings: robust

- three-dimensional reconstruction from two dimensional images. *J Exp Biol*, 1997, 200:2693-2704
- [27] Wakeling J M., Ellington C.P. dragonfly flight. I. Gliding flight and steady-state aerodynamic forces. *J Exp Biol*, 1997,200:543-556.
- [28] Wakeling J M., Ellington C P. dragonfly flight. II. Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight. *J Exp Biol*, 1997,200:557-582
- [29] Willmott A P., Ellington C P. The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca sexta*. I. Kinematics of hovering and forward flight. *J Exp Biol*, 1997, 200: 2705-2722.
- [30] Schilstra C., Van Hateren J H. Blowfly flight and optic flow. I. Thorax kinematics and flight dynamics. *J Exp Biol*, 1999, 202:1481-1490.
- [31] Schilstra C., Van Hateren J H. Blowfly flight and optic flow. II. Head movements during flight. *J Exp Biol*, 1999, 202:1491-1500.
- [32] Wang H., Zeng L J., Liu H., et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies. *J Exp Biol*, 2003, 206: 745-757
- [33] Zeng L J., Matsumoto H., Kawachi K. A fringe shadow method for measuring flapping angle and torsional angle of a dragonfly wing. *Meas Sci Technol*, 1996, 7:776 -781.
- [34] Zeng L. J., Hao Q., Kawachi, K. A scanning projected line method for measuring a beating bumblebee wing. *Optics Commun*. 2000,183:37 -43
- [35] Fry S N., Sayaman R., Dickinson M H. The Aerodynamics of free-flight maneuvers in *Drosophila*. *Science*, 2003,300: 495-498.
- [36] Grodnitsky D L., Morozov P P. Flow visualization experiments on tethered flying green lacewing *Chrysopa dasyptera* McL.(Neruoptera:Chrysopidae). *J. Exp. Biol*. 1992,169:143-163.
- [37] Grodnitsky D L., Morozov P P. Vortex formations during tethered flight of functionally and morphologically two-winged insects, including evolutionary considerations on insect flight. *J.*

- Exp. Biol. 1993,182,11-40
- [38] Ellington C P., Van den Berg C., Willmott A P., et al. Leading-edge vortices in insect flight. Nature. 1996,384: 626-630.
- [39] Willmott A P., Ellington C P., Thomas A L R. Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, *Manduca sexta*. Phil Trans R Soc Lond B, 1997,352: 303-316.
- [40] Srygley R B., Thomas A L R. Unconventional lift-generating mechanisms in free-fling butterflies. Nature. 2002,420:660-664.
- [41] Dickinson M H, Lehmann F O., Sane S R. Wing rotation and the aerodynamic basic of insect flight. Science, 1999,284:1954-1960.
- [42] Birch J M., Dickinson M H. Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. Nature, 2001 ,412:729-733.
- [43] Thomas A L R., Taylor G K., Srygley R B., et al. Dragonfly flight: free-flight and tethered flow visualization reveal a diverse array of unsteady lift-generating mechanisms, controlled primarily via angle of attack. 2004,207:4299-4323.
- [44] Savage S, Newman B, Wong D. The role of vortices an unsteady effects during the hovering flight of dragonflies. J Exp Biol, 1979,83: 59-77
- [45] Sanjay P. Sane and Michael H. Dickinson. The aerodynamic effects of wing rotation and a vised. quasi-steady model of flapping flight. J Exp Biol, 2002,205: 1087-1096
- [46] Azuma A., Azuma S., Watanabe I., et al Flight mechanics of dragonfly. J Exp Biol, 1985,116:79-107
- [47] Azuma A., Watanabe, T. Flight performance of a dragonfly. J Exp Biol, 1988 ,137:221-252.
- [48] Sato M., Azuma A. Flight performance of a damselfly *Ceriagrion selys*. J Exp Biol, 1997,200:1087-1096
- [49] Van Den Berg C., Ellington C P. The vortex wake of a 'hovering ' mode l hawk moth. Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1997,352:317:328,

- [50] Van Den Berg C., Ellington C P. The three-dimensional leading-edge vortex of a 'hoveing' model hawkmoth. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1997,352:329-340,
- [51] Tytell E D., Ellington C P. How to perform measurements in a hovering animal's wake: physical modelling of the vortex wake of the hawkmoth, *Manduca Sexta*. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 2003,358: 1559-1566.[52]<http://socrates.berkeley.edu/~flymanmd/>
- [53] Dickson W B., Dickinson M H. The effect of advance ratio on the aerodynamics of revolving wings. *J Exp Biol*, 2004,207: 4269-4281.
- [54] Wakeling J M, Ellington C P. Dragonfly flight .II. Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight. *J Exp Biol.* 1997b ,200:557-582,
- [55] Wakeling J M, Ellington C P. Dragonfly flight. III. Lift and power requirements, 1997c ,200:583-600,
- [56] Wang Z J. Two dimensional mechanism for insect hovering . *Physical Rev Lett*, 2000b ,85:2216-2219
- [57] Sun M, Lan S L. A computational study of the aerodynamic forces and power requirements of dragonfly (*Aeschna juncea*) hovering. *J Exp Biol*, 2004, 207: 1887-1901.
- [58] Maybury W J., Lehmann F O. The fluid dynamics of flight control by kinematic phase lag variation between two robotic insect wings. *J.Exp.Biol.*2004, 207:4707-4726.
- [59] 孙茂, 吴江浩. 昆虫飞行的高升力机理和能耗. *北京航空航天大学学报*,2003, 29:970-977.

第二章 活体自由飞行参数的观测

2.1 引言

昆虫是出现最早，体积最小的飞行者，在经历了数亿年的进化历程后，昆虫具有高超的飞行技巧^[1]，可以在极短的时间内完成一系列复杂的飞行动作，如：快速启动、急速转弯、翻跟头等。近百年来，对于昆虫如何控制翅膀达到如此飞行能力，科学家们致力于通过研究昆虫的飞行动作来揭示其中的运动机理。特别是近年来 MAV(Micro Air Vehicle)概念的提出更加速了科学家们对昆虫飞行仿生学的研究。由于三维信息总是隐藏在二维图像中，为了能够定量地分析，需要对二维图像进行三维重构来获得三维信息。双目视觉是三维测量的主要方法^[2]。理想的三维重构需要在两个或者多个视点同时观测，如 Willmott 和 Ellington^[3]采用两个相机对悬停和前飞的天蛾(*Manduca Sexta*)的飞行过程进行了研究；Askew 等^[4]采用两个相机计算了昆虫的起飞过程质心的运动轨迹；Fry 等^[5]采用三个摄像机捕获了果蝇自由转弯过程翅膀拍动模式，翅膀拍动的角度、速度等；但是由于昆虫的翅膀高频拍击(例如果蝇的拍击频率为 200Hz^[6])，以及自由飞行较强的机动性对高速摄像机性能要求较高，加上采用多个相机还会有诸多的不一致性^[7]，需要附加同步电路等，实验人员受实验条件的限制往往只能采用一个高速摄像机来观察^[8]。

采用单个相机也可以完成三维重构，如灰度法^[9]。但成功地用来研究昆虫飞行的是 Dudley 和 Ellington^[10]基于左右两边翅膀对称假设的前提下用单个摄像机观察了大黄蜂在旋转条纹和紫外光刺激下的自由前飞过程，获得了大黄蜂在自由前飞过程中的拍动角、翅尖轨迹等。后 Willmott 和 Ellington^[11]总结了单摄像机三维重构方法如对称法、平面法、条杆法、标记法等，并通过试验作了对比，提出

四种方法中条杆法是实验中最精确和稳定的一种方法,但是需要假设被测量翅膀是绕一个已知的刚性轴旋转。事实上,真实的飞行过程都很难以和这些假设吻合,做出这些假设都只是一种近似,因此基于单一摄像机实现从二维到三维的转换要求提出新的、更为可行的方法。Zeng 等^[12]给出了一种用反射镜和一个摄像机同时拍摄两个方向的图像研究昆虫飞行。

另外,早期的工作多是基于捆绑的昆虫来研究其飞行动作的,尽管观察到了一些基本的拍动规律,但是由于捆绑与自由飞行的存在一定的差异,捆绑状态的研究结果还不能完全反映自由飞行状态下的运动形式。实现自由飞行状态的飞行参数观测是近年来的研究趋势^[10,13,14,15]。一些文献^[13-15]已给出了自由飞行的参数测量方法。

本章提出通过在单一高速摄像机镜头前面增加附加光学装置(stereo adapter)来实现三维重构,该装置由两两平行的四块平面镜组成,呈现对称分布,物体发出的光进入镜头被分成两束,分别透射在底片的两侧。使得同一物体通过该装置后形成两个物像。由于两组平面镜与物体的相对位置不同,故可以等效于使用两个高速相机对从不同角度对物体进行拍摄。本章给出了一种基于单一摄像机的三维重构新方法,该方法可以用来测量自由飞行昆虫的翅膀三维信息,克服了过去基于翅膀拍动某些假设的限制。

2.2 实验装置与方法

2.2.1 实验活体

苍蝇是昆虫中机动飞行能力较强的一种昆虫,它可以灵活地控制飞行动作,能够在快速飞行中急剧减速、悬空停留、以不超过其身长的半径转弯,然后肚朝上飞行,翻跟头、作横向翻滚、最后停留在天花板上,这些系列的动作可以在几分之一秒内完成。为了研究其机动飞行过程翅膀拍击的规律,我们选取苍蝇作为

研究对象，观察其机动飞行过程左右两个翅膀参数。实验的苍蝇活体是通过在户外采用食物引诱捕获的，从中选取最活跃的作为实验对象，将其置于尺寸为： $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 80\text{mm}$ 的玻璃箱体中。同时为了不让强烈的背景灯光对其活力产生影响，每次实验时间控制为 45 分钟左右。

2.2.2 实验装置及原理

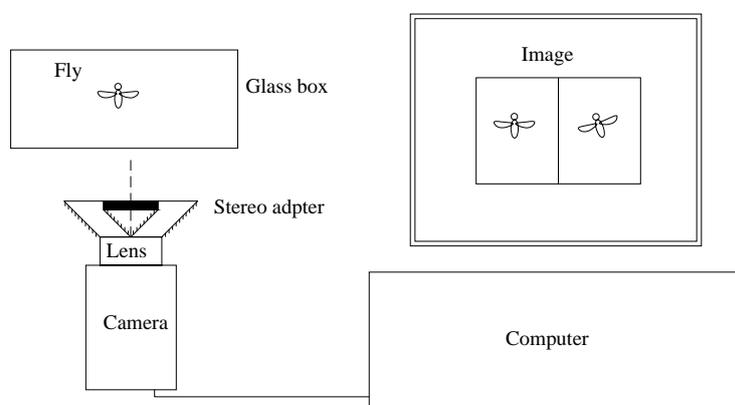


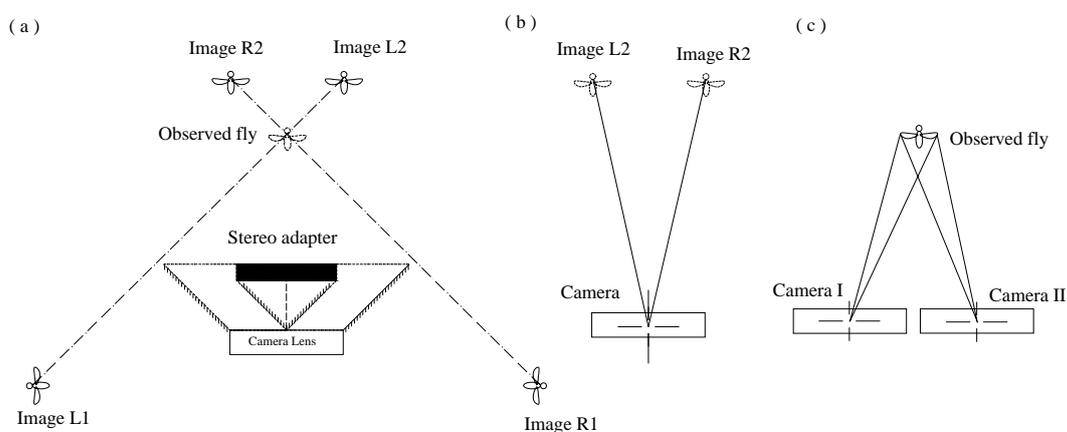
图 2.1 实验装置图

Fig 2.1. Experimental system

实验通过在高速摄像机(*HG-100K, Redlake MASD*)镜头(*Nikon Macro1:2, ϕ 72 mm*)前面加了一个光学装置(*Stereo adapter, ϕ 52mm, Pentax*)来获得不同角度的两个图像，图 2.1 所示整体设备安装结构示意图示意。高速摄影的拍摄速度是 3000 帧/秒，曝光时间为 $330\ \mu\text{s}$ ，照片像素尺寸为 800×600 ，投影灯工作功率为 1000W。

该附加光学装置(*Stereo adapter*)由四块平面镜构成，对称地分布在轴线两侧，如图 2.3(a)所示，左边、左边的两块分别平行，中间、两侧的两块分别垂直。放置在前方的物体首先经过两侧较长的一组平面镜在左右两侧成像 L_1 和 R_1 ，然后在由中间较短的一组平面镜对 L_1 和 R_1 再次成像 L_2 和 R_2 ，其中 R_2 位于左边， L_2 位于右边，由于平面镜成像等大，在经过两次成像以后得到的 L_2 和 R_2 没有改

变像的大小。从图 2.3(b)中可以看出, 经过该装置(stereo adapter)以后拍摄的效果等同于高速摄像机直接对像 L_2 和 R_2 两处的物体进行拍照, 由于 L_2 和 R_2 是活体的两个角度的成像, 等效于对活体用两个相机拍摄, 如图 2.3(c)示意, 在同一幅照片上得到了两个不同的像。把左边的光路看作一个摄像机 I, 右边的光路也看作一个摄像机 II, 两个摄像机符合双目视觉三维重构的要求。利用这一装置可以实现对物体的三维重构。



图

2.3 附加光学装置原理图

Fig 2.3 The optical mechanism of stereo adapter

2.2.3 相机模型

三维重构需要确定两个摄像机的内外参数, 即分别确定每个等效摄像机的图像和空间坐标之间的对应关系。我们将左边光路与镜头看作一个摄像机, 右边光路与镜头也看做一个摄像机。这里先考虑 stereo adapter 一边所成像与物体空间坐标的关系, 即 camera I 的参数, 引入了三个坐标系, 即图像坐标系, 相机坐标系和空间坐标系。其位置关系如图 2.4 表示。右边的光路同样原理。

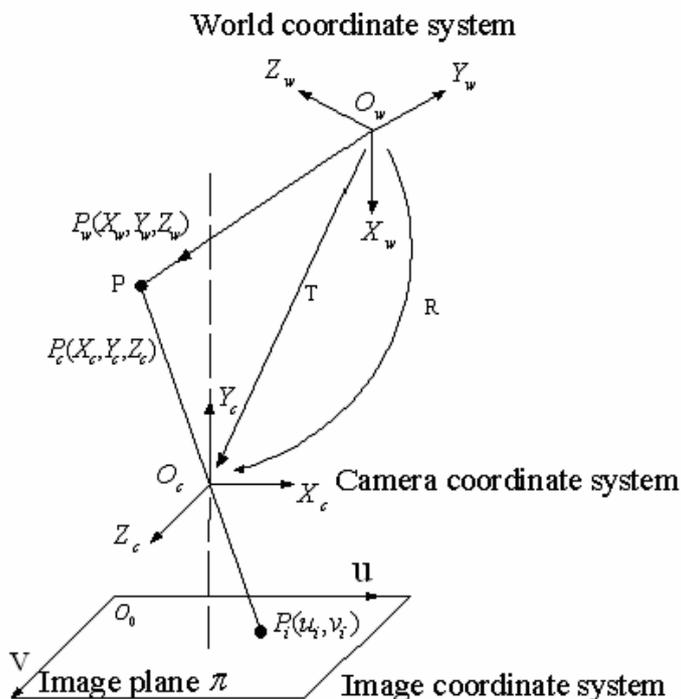


图 2.4 三个坐标系的空位置关系， P 是空间任意一点，在空间坐标系 $X_wY_wZ_wO_w$ 下的坐标是 P_w ，在摄像机坐标系下是 P_c ，相机空间坐标系和相机的坐标系可以通过旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 来达到重合， P 点经过镜头在图像屏幕成像 P_i 。

Fig 2.4 The three coordinate systems for the three-dimensional image reconstruction.

图 2.4 中下标为 I 表示的是图像坐标系的参数，下标为 C 表示得是相机坐标系下的参数，下标为 W 表示的是空间坐标系的参数。由 $X_wY_wZ_wO_w$ 构成空间坐标系，坐标原点是 O_w 。 $X_cY_cZ_cO_c$ 构成相机坐标系，坐标原点是 O_c ， uov 构成图像坐标系(以像素作为单位),坐标原点 O_0 。图 2 最下面的平面 π 表示的是图像平面，也就是投影平面。

记空间任意一点 P ，其空间的坐标系下的坐标是 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ ，相机坐标系下的坐标是 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 。点 P 经过镜头成像为点 P_i ，像素坐标原点在图像左上角，像素坐标轴为 u, v ，其中 u_i, v_i 表示的是点像 P_i 对应像素坐标。相机坐标系和空间坐标系可以通过旋转加平移使得它们重合，图 2.4 中的 R 表示

3*3 的旋转矩阵， T 表示的是 3*1 平移向量。

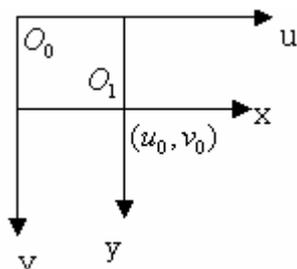


图 2.5 图像坐标系

Fig.2.5 Image coordinate system

由于像素坐标 (u, v) 是表示像素在图像中所处的行数与列数，并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置，因此需要建立以物理单位为尺寸的坐标系。该坐标系以图像内某一点 O_1 为原点， x 轴与 y 轴分别与 u, v 平行，如图 2.5 表示，在 x, y 坐标系中原点 O_1 定义在摄像机光轴与图像平面的交点。若 O_1 在 u, v 坐标系中的坐标为 (u_0, v_0) ，每个像素在 x 轴与 y 轴方向上的物理尺寸为 dx, dy ，则图像中任意一个像素在两个坐标系下的关系可以表示为公式(2.1)。

$$\begin{aligned} u &= \frac{x}{dx} + u_0 \\ v &= \frac{y}{dy} + v_0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

用齐次坐标与矩阵的形式将(2.1)改为(2.2)。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

由于相机坐标系和空间坐标系可以通过旋转加平移来重合，那么二者的关系可以表示为公式(2.3)。其中 R 为 3*3 的正交矩阵表示三个方向发生的旋转量， t 为三维的平移向量， M_1 为 4*4 矩阵。

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

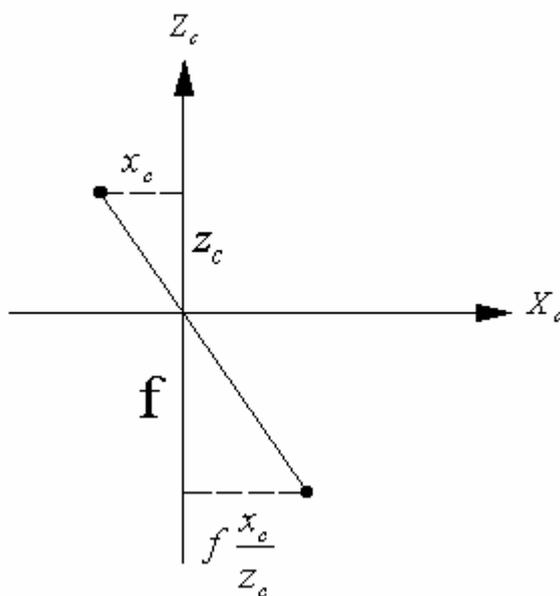


图 2.6 针孔模型

Fig 2.6. Pinhole model

图像坐标系和相机坐标系是通过针孔模型来联系起来的。针孔模型是机器视觉里最为简单的成像模型，也称作中心射影或透视投影，图 2.6 表示出了其成像的原理，在相机坐标系下坐标为 (X_C, Y_C, Z_C) 的点对应的在图像坐标系下投影的坐标是 (x, y) ，其关系如公式(2.4)表示。

$$x = \frac{fX_c}{Z_c}, y = \frac{fY_c}{Z_c} \quad \text{or} \quad Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

将公式(2.2)(2.3)代入(2.4)得到公式(2.5)，它表示 P 点空间坐标与其投影点的像素

坐标之间的关系。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\text{令 } M_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad M = M_1 M_2$$

其中 $\alpha_x = \frac{f}{dx}, \alpha_y = \frac{f}{dy}$ 那么公式(2.5)也可以表示成(2.6)的形式, M_1 只与相机的内部结构有关, 称内部参数矩阵, M_2 表示相机相对于空间坐标系的关系, 称为外部矩阵[16]。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

令 m_{ij} 为 M 的 i 行 j 列的元素。那么有公式(2.7)表示的关系:

$$\begin{aligned} m_{11} &= \alpha_x R_{11} + u_0 R_{31} & m_{12} &= \alpha_x R_{12} + u_0 R_{32} & m_{13} &= \alpha_x R_{13} + u_0 R_{33} & m_{14} &= \alpha_x T_1 + u_0 T_3 \\ m_{21} &= \alpha_y R_{21} + v_0 R_{31} & m_{22} &= \alpha_y R_{22} + v_0 R_{32} & m_{23} &= \alpha_y R_{23} + v_0 R_{33} & m_{24} &= \alpha_y T_2 + v_0 T_3 \\ m_{31} &= R_{31} & m_{32} &= R_{32} & m_{33} &= R_{33} & m_{34} &= T_3 \end{aligned} \quad (2.7)$$

上面提到的这些关系同样对于右边的光路也适用。

2.2.4 相机标定以及三维重构

相机标定程序主要是计算公式(2.6)中 M 矩阵的每个元素的数值大小，确定出了这个矩阵就知道了图像坐标和空间坐标的对应关系，进而可以通过图形像素坐标来计算其空间运动信息。

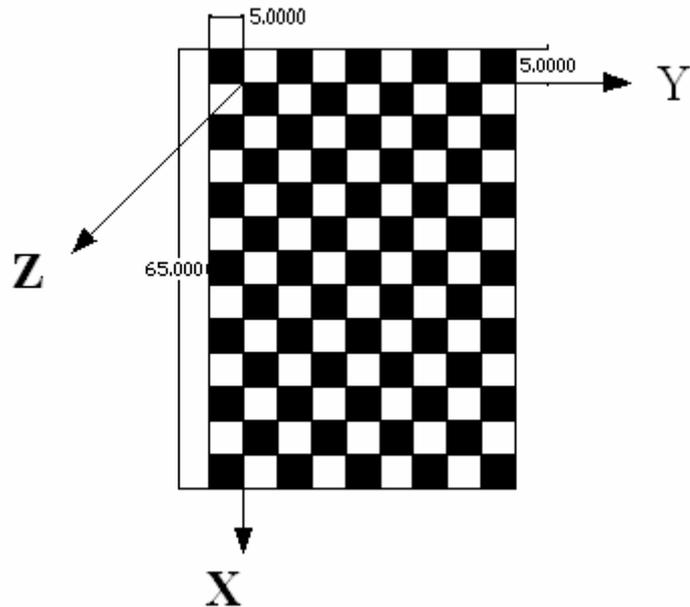


图2.7. 标定板，采用这个标定板分布标定出两个等效摄像机的投影矩阵 M_1, M_2 ，以竖直方向为 X 轴，水平为 Y 轴，如图建立空间坐标系。

Fig.2.7 The calibration board used to obtain the matrix M , the XY coordinate is attached on the calibration board plane, the Z axis is perpendicular to the plane of the calibration board.

标定采用平板标定方法[17]，标定板由黑白相间的正方形格子构成，边长都是 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，如图 2.7 所示，取标定板最左上方格子的顶点作为空间坐标原点，这样可以知道每个网格顶点的空间坐标，标定板上共有 96 个格子，它们的相对位置都是固定的。 x, y, z 轴如图 5 所示，照片可以确定出每个顶点的像素坐标。知道每个顶点的图像坐标和空间坐标，将其代入公式(2.6)可以看出，对于每个点都有如下的方程(2.8)。

其中 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 是点对应的空间坐标, (u_i, v_i) 是其图像的像素坐标, m_{ij} 是矩阵 M 的 I 行 J 列的元素, 方程(2.8)可以写成方程(2.9)的形式。

$$Z_c \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} Z_{ci}u_i &= m_{11}X_{wi} + m_{12}Y_{wi} + m_{13}Z_{wi} + m_{14} \\ Z_{ci}v_i &= m_{21}X_{wi} + m_{22}Y_{wi} + m_{23}Z_{wi} + m_{24} \\ Z_{ci} &= m_{31}X_{wi} + m_{32}Y_{wi} + m_{33}Z_{wi} + m_{34} \end{aligned} \quad (2.9)$$

将(2.9)中的第一个和第二个分别与第三个方程相除的得到, 方程(2.10), 每个点都可以写出方程(2.10)的形式, 如果有 n 个点就可以构成方程组(2.11)。

$$\begin{aligned} X_{wi}m_{11} + Y_{wi}m_{12} + Z_{wi}m_{13} + m_{14} - u_iX_{wi}m_{31} - u_iY_{wi}m_{32} - u_iZ_{wi}m_{33} &= u_im_{34} \\ X_{wi}m_{21} + Y_{wi}m_{22} + Z_{wi}m_{23} + m_{24} - v_iX_{wi}m_{31} - v_iY_{wi}m_{32} - v_iZ_{wi}m_{33} &= v_im_{34} \end{aligned} \quad (2.10)$$

可以看出方程(2.11)有 $2n$ 个方程, 12 个未知数, 所以当 $n \gg 6$ 时, 方程的个数远大于未知数的个数, 利用最小二乘法可以求出 M 矩阵。方程(11)写作形式是 $KM=U$, 那么利用最小二乘法可以按照(2.12)来求 M 。同样的道理可以确定右边光路的 M 矩阵。

左右两个光路都可以写出公式(2.10)的形式, 那么对于同一个点就可以写出来 4 个方程, 方程 2.13 所示。

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_{w1} & -u_1Y_{w1} & -u_1Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1X_{w1} & -v_1Y_{w1} & -v_1Z_{w1} \\ & & & \dots & \dots & \dots & & & & & \\ & & & \dots & \dots & \dots & & & & & \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nX_{wn} & -u_nY_{wn} & -u_nZ_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_nX_{wn} & -v_nY_{wn} & -v_nZ_{wn} \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} & \times & \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} u_1 m_{34} \\ v_1 m_{34} \\ \dots \\ u_n m_{34} \\ v_n m_{34} \end{bmatrix} & (2.11)
 \end{matrix}$$

$$M = (K^T K)^{-1} K^T U \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
 (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) X_w + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) Y_w + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) Z_w &= m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\
 (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) X_w + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) Y_w + (u_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) Z_w &= m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\
 (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) X_w + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) Y_w + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) Z_w &= m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\
 (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) X_w + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) Y_w + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) Z_w &= m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2
 \end{aligned} \quad (2.13)$$

(2.13)中上标为 1 的 m 元素表示是左边的光路参数。2 表示右边的参数。标定出左右的矩阵 M 以后就可以利用(2.13)通过图像的坐标来求空间坐标。

2.2.5 特征点识别

处理的图像是灰度图像，通过计算图像的灰度梯度来识别边缘轮廓，在 `matlab` 中采用 `candy` 算子先增强再提取边缘点集。由于翅膀拍动过程出现重叠现象，遮挡导致难以识别特征点的位置，为此，采用插值方法，即将其前一个动作和后一个动作的中间位置作为遮挡时候的位置来计算。同时由于遮挡出现图像重叠，重叠部分的灰度值将变小，结合这两种方法可以有效地获得特征点的像素位

置。

2.3 结果和讨论

2.3.1 图像分析

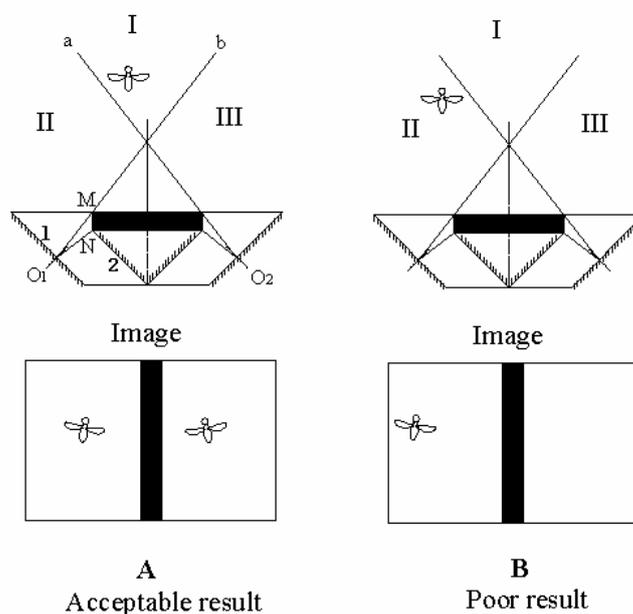


图2.8 拍摄照片的两种情形，(A)中可以在两侧都看到图像，(B)中只能看到一侧有图像。在镜头前面分出三个区域 I、II 和 III，其中 I 和 III 对称分布，M、N 似乎两个端点，光线 b 经过 O_1 后恰好被发射到 N 上，光线 a 在右侧也是这样的情形，I、II、III 区正是由光线 a 和 b 形成的，光线 a 和 b 是两条边界光线，只有夹在她们之间的才可以最后都在像照片上出现，而如果苍蝇飞到 I 或者 III 区域如 B 一样，那么就最后只能看到一个图像也就不能进行三维重构了。

Fig 2.8 Two possible conditions, (A) two image can be seen on same image. (B) only one image can be seen on the image.

正如图 2.8 中所示意的一样 stereo adapter 对物体经过两次平面镜成像后呈现出两个不同角度的像，等效于从两个角度观察物体，然后由高速摄影进行拍摄。

和两个相机的拍摄效果一样，理论上如果苍蝇能在对称线上，那么最后拍摄的图像也是对称结构的，但是事实上，苍蝇的飞行位置具有随机性，飞行的位置可能是任何一个位置，图 2.8 给出了几种情形，在 Fig.2.8(A)是较为理想的情形，可以在看到两个图像，图 2.8(B)中由于镜头的视场有限，常常会出现照片上只有一个或者一个都没有的情形。给重构增加了困难。有时候的照片上左边的图像清晰，而右边的图像进入到中间的黑色条带中。另外，如何能在左右两边都捕捉其优美的飞行动作，象报道(Tammero and Dickinson, 2001)[18]提到的一样，提高拍摄速度会影响到其视场的大小，试验中当相机的速度是 1000 帧/秒时候，试验可以观察到范围是 20 厘米，到 5000 帧/秒时候，视野范围还不到 2 厘米，试验中 3000 帧/秒是一个较为能接受的速度，可以观察到的范围是 5 厘米，这范围内可以使得苍蝇完成任何一个动作，在两边都可以看到清晰的图像。

实验过程中我们制作了三个不同的玻璃箱，最大的尺寸是 300*200*200 毫米，由于空间较大，实验活体常飞出视野范围，很难捕获到其转弯的过程，最小的一个 30*50*50 毫米，或许是由于空间太小的缘故，苍蝇飞的很少，多数时间都不飞，开始放入时会飞，但是当发祥频繁撞击玻璃箱以后就开始不飞了，只是沿着玻璃箱走动，即使敲打玻璃箱它都不理睬。中间尺寸的既可以让它自由飞，但是又不得不不断地调整飞行动作以使得不至于撞击玻璃壁面。

2.3.2 轮廓识别

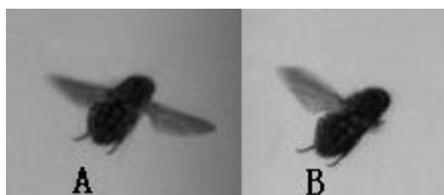


图2.9. 在提取像素坐标时候的两种不同情形，A 可以清楚地看到翅尖位置，B 中右翅与身体的投影重叠在一起。

Fig.2.9 Two possible conditions exist for the pixel coordination extracting, A: two wing tips can be clearly identified, B: one of the wing tips is overlapped with the fly's body thus only one wing tip can be identified.

拍摄的照片从相机的内存下载以后保存成 JPG 格式然后进行分析，如何准确提取苍蝇图像中翅膀尖的像素坐标直接影响到最后计算空间坐标的准确性，本文中分别提取了每个图像的左右两个翅膀尖的像素坐标来分析，通常情况下，如图 2.9A 在图像上可以清晰地看到翅膀尖的位置，但是有时候会出现图 2.9(b)的情况，翅膀尖和身体重叠在一起，这样很难以从中确定其位置，我们取前一帧和后一帧坐标的平均值作为这次的翅膀尖的位置。这样的情形只出现在上挥或者下拍的过程中，因为在拍动到最高位置或者最低位置都可以看得很清晰，不会出现重叠遮挡情形，也不会出现其前后两幅照片都在同一侧，所以采用前后两幅的平均值的处理方法可行。

图形的灰度分布在 $[0, 255]$ 范围内，为了尽可能的准确确定其坐标，采用 matlab 的边缘确定算法(canny edge detector)先确定出来翅膀的边缘，然后在边缘上找到翅膀尖。

2.3.3 误差分析

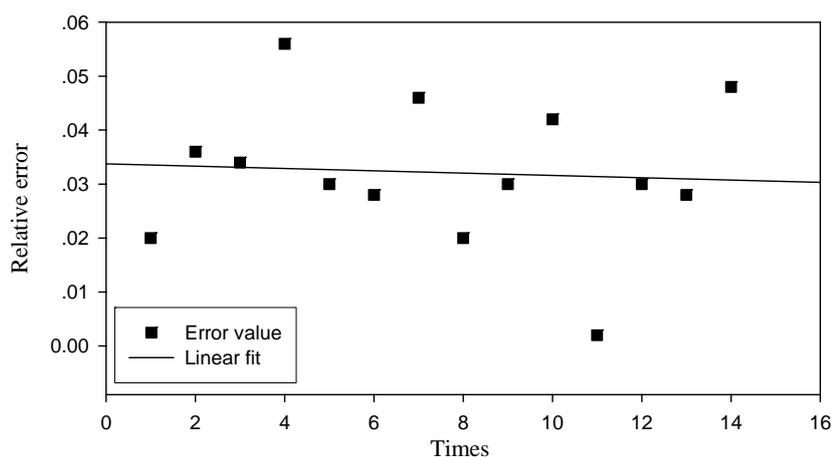


图 2.10 计算值和真实值的相对误差

Fig.2.10. The computed length errors against its real given value

相机的模型采用线性针孔模型(Abdel-Aziz and Karara, 1987)。采用 matlab 标定程序进行标定，标定计算后的左右两个等效摄像机的 M 矩阵如表 1 所示。

计算程序使用 matlab 编写，为了检验用该系统完成三维重构的结果与真实目标长度的误差，用该系统多次从不同角度测算了一已知边长物体，计算的最大相对误差为 4.8%，最小为 0.2%，表明用来计算苍蝇翅膀参数可以接受。引起误差的主要原因是相关特征点的像素坐标提取引起，由于人为和边缘识别算法的原因导致不能准确确定特征点的像素坐标，采用亚像素(sub-pixel)处理方法可以进一步提高像素坐标精度。

表.1 图像坐标系与空间坐标系之间的转换矩阵

Table 1. Translational matrix between image coordinate system and world coordinate system

	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{21}	m_{22}
摄	562.1674	2398.470	-1453.992	9134.267	2772.422	-724.0410
像机 I	m_{23}	m_{24}	m_{31}	m_{32}	m_{33}	m_{34}
	-260.6328	81579.73	-0.0207	-0.3731110	-0.927555	45.0748
	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{21}	m_{22}
摄	466.5012	1845.015	-2188.395	239190.5	2765.033	-772.5167
像机 II	m_{23}	m_{24}	m_{31}	m_{32}	m_{33}	m_{34}
	-85.22093	77861.63	-0.148209	-0.664448	-0.73249	449.2037

以同样的方法标定左右出两个矩阵，公式(2.9)中上标为 1 代表 camera I，2 代表 camera II，知道点对应的图像的像素坐标以后就可以一起代入(2.13)来求出空间坐标。

2.3.4 与两个相机的比较

利用两个相机来实现三位重构需要附加一个同步电路来保证两个相机的拍摄是在同一时刻(Tammero and Dickinson, 2001 using pluses generated by a pulse generator, BSG-50, Horita), 三个相机可以准确计算出研究对象的空间位置, 可以避免对应点匹配的歧义性, 但是其视野往往受到限制, 而且对于研究活体来实现控制其出现在研究视场有一定的困难, 多个相机会使得试验的费用高昂。本文中描述的重构方法只是需要一个相机, 尽管视场也受到了限制, 但是可以达到 3000 帧/秒的速度。这样的方法对于实现三维重构是可行的。

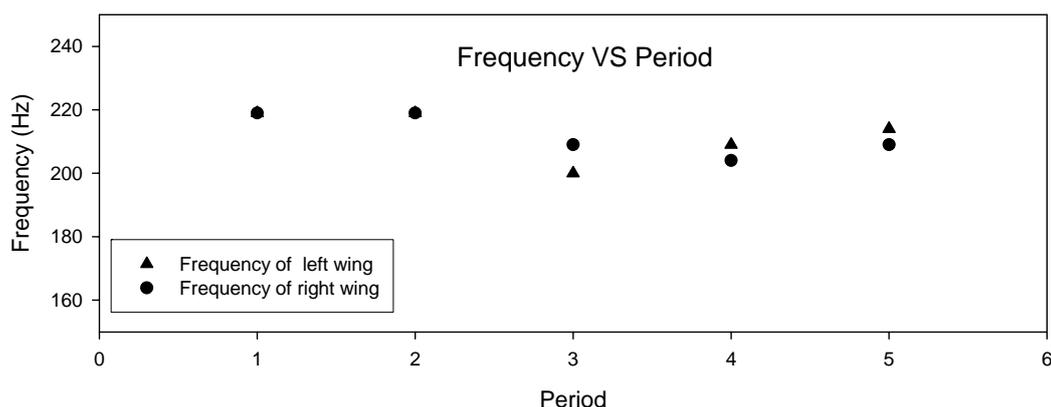


图 2.11 弯过程的拍击频率

Fig 2.11 Flapping frequency during turning

2.3.5 转弯过程两翅膀拍动频率

每两帧照片的时间间隔是 1/3000, 通过连续统计其三个拍动周期所用的时间来计算频率, 共计算了 15 个拍动周期, 获得了 5 个频率值, 如图 2.11 所示意。左右翅膀拍动频率整个过程没有出现显著的变化, 而且两翅膀的拍动频率基本一致, 在完成转弯后的频率有减小的趋势。

2.3.6 运动图像

实验中我们分析了一个简单的转弯过程，每隔 5ms 提取一个图像，列出如图 2.12，共 15 个动作，从图 2.12 中看出，在前 20ms 内苍蝇绕身体轴(连接身体前后端点的线)转动(roll)，前 20ms 内轴线的方向基本没有变化。此后内的身体轴开始偏移(yaw)。表明在 0-20ms 内完成的动作是绕自身的轴线转动(roll)。以后的几个动作的可以看出身体轴线都在偏移，也就是后面都是水平方向的转弯(Yaw)过程或者是身体倾角的上下调节(pitch)。

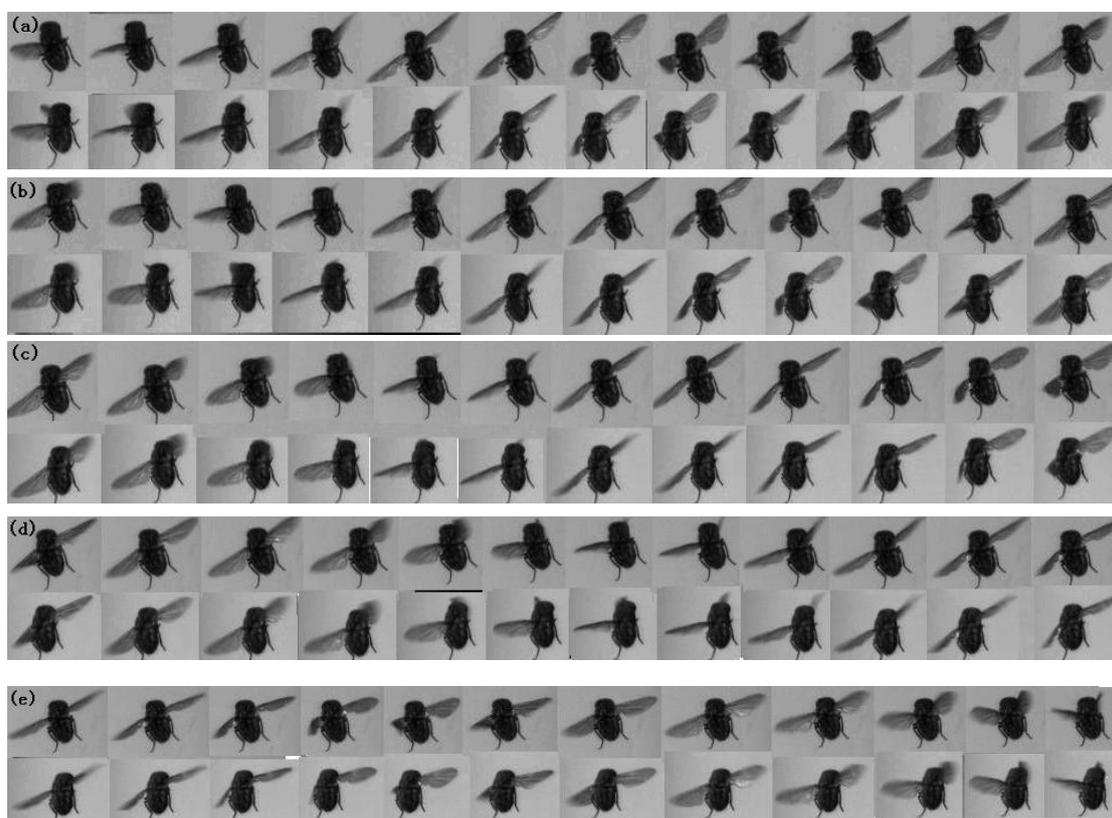


图 2.12 0-20ms 的飞行姿态(间隔 1/3ms)

Fig2.12 Flying model during 0-20ms (step 1/3ms).

2.3.7 翅膀尖运动轨迹

为了定量地分析这个过程，计算了两个翅尖在整个过程中的空间坐标和速度。

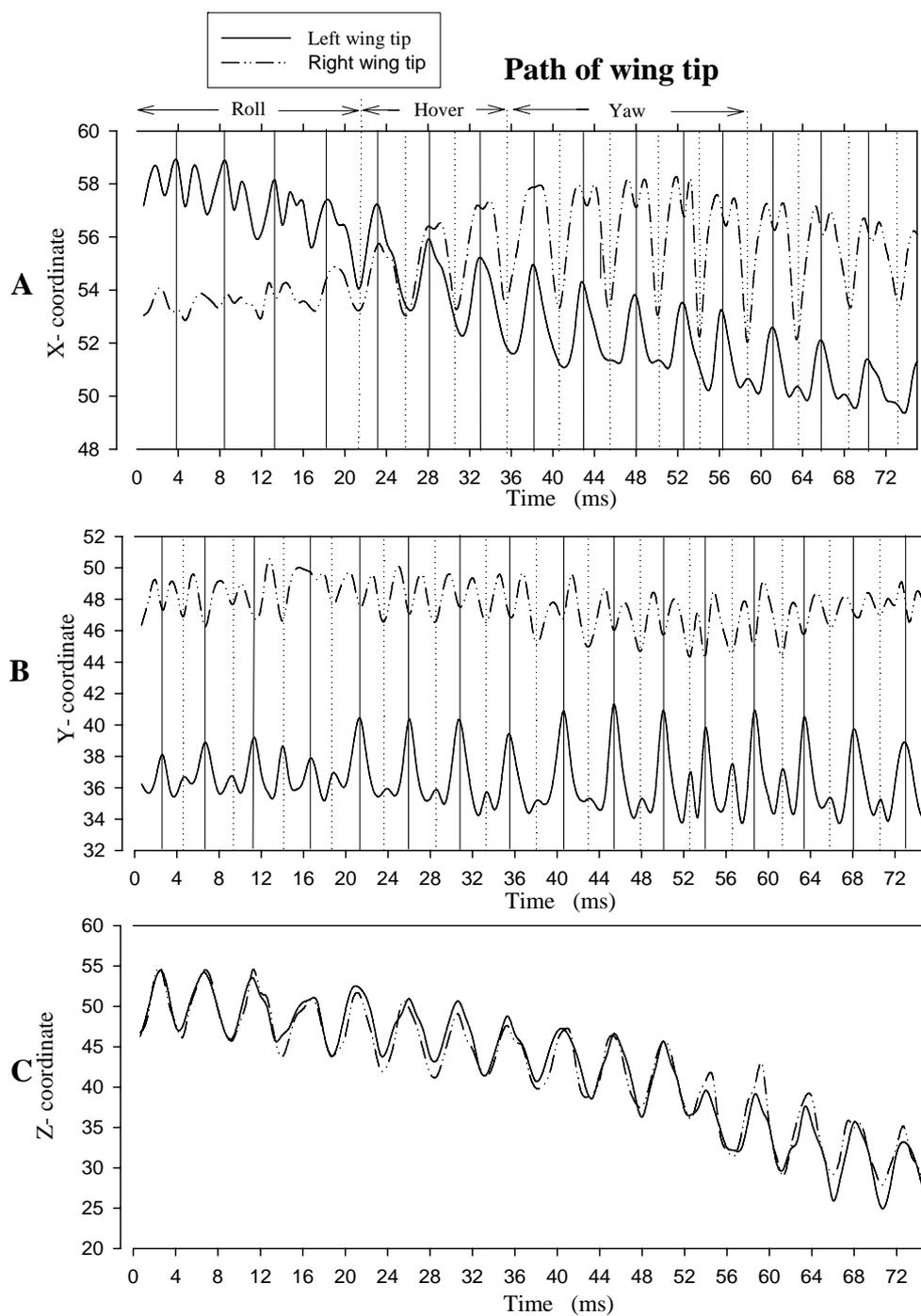


图 2.13 左右翅尖空间坐标对比

Fig2.13 Contrast of 3D coordinates between left and right wing.

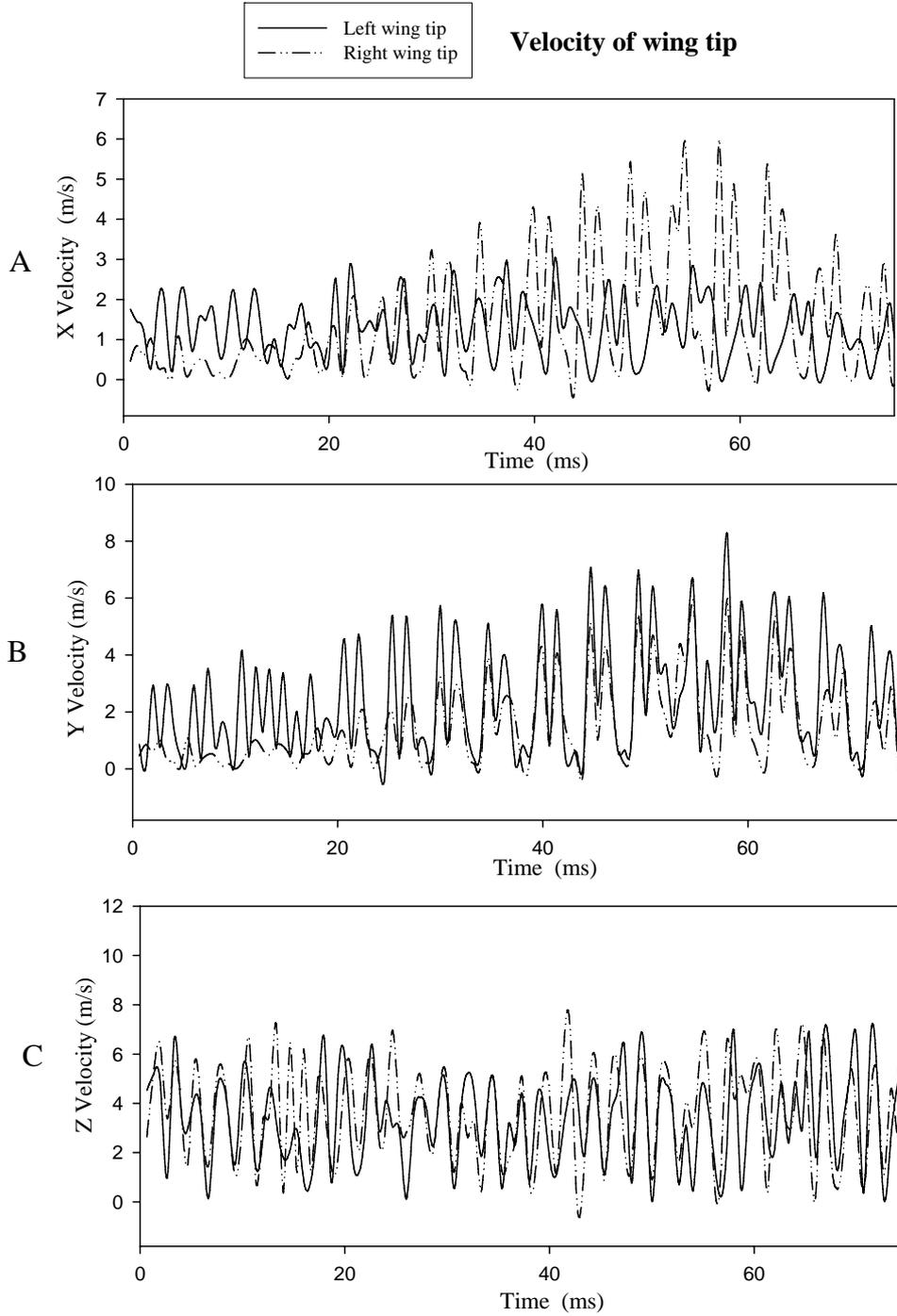


图 2.14

左右翅膀尖运动速度对比

Fig 2.14 Velocity curve of two wings

2.3.8 振幅

图 2.13 中说明的是在转弯(绕自身旋转等)过程翅膀尖的三维空间位置变化规律, 图 2.13 A, B, C 分别表示在 x, y, z 三个方向左右翅膀尖的规律(空间坐标系见图.5)

图 2.13A 可以看出在 x 方向, 开始是左边翅尖位置较低(x 轴方向向下, 数值越大表明位置越靠下), 即开始身体是左倾, 然后逐渐左边翅尖位置拍动位置抬高(x 值减小), 到 26ms 的时候坐标大小基本相等, 这个过程身体的轴线基本没有变化, 表明这个过程完成的是一个绕身体发生扭转过程(roll)。同时这个过程左边翅膀的振幅大于右边翅尖的振幅, 即上下拍动左边翅膀的幅度较大。此后在水平转弯结束后右边的翅尖的位置较低, 拍动幅度明显变大, 最大有 6mm 左右, 而左边的拍动幅度基本没有什么变化。由于转动过程的惯性作用, 为了不至于继续转下去, 右边翅膀需要加大拍动幅度来缓冲抵消由于扭转过程的惯性作用依变控制方向。

图 2.13B. y 方向的运动对水平旋转(Yaw)起作用, y 方向坐标的变化在开始的滚转阶段没有显著的变化。从悬停开始, 左边翅膀的 y 向振幅变大, 对应的照片显示, 在 y 向振幅加大的过程中, 苍蝇的身体发生了水平转动(Yaw)。由于 y 轴向右边, 且转弯小角度, 所以右边的翅膀的 y 坐标一直大于左边翅尖 y 坐标。振幅是 20ms 以后开始左边的翅膀尖的 y 向振幅显著变化, 这个应该对向右转起作用。

图 2.13C 显示, 开始的时候基本左右翅尖的 z 坐标曲线大致吻合, 这个时候发生的是绕自身的旋转, 短暂的悬停过程中 20ms 左右时候曲线出现差异, 是由于水平方向的转向引起 z 轴坐标的变化。

图 2.14 中的速度曲线的趋势与图 2.14 的位置趋势差别不大, 速度采用的是利用

样条函数求各个方向的空间曲线轨迹的斜率所得。

2.3.9 翅膀不对称拍动分析

图 2.13 中在转弯过程中的一个有趣的现象就是拍动不对称曲线，在 x 方向悬停完成后左翅膀的波峰对应右边波谷，图 2.13A 和 B 中清楚的看出其对应情况。拍动轨迹不再是完整的正弦或余弦曲线，而是在其即将发展到最大值的时候加入一个小的反向波动曲线。而且每次都是以左变大波峰对应右边小波谷。如果说振幅对于转弯起作用的话，那么两翅膀的这种相位差也必然多转弯有贡献。由于两翅膀的拍动不对称性必然会导致身体的受力不平衡，这样必然对身体产生一个扭矩，进而导致身体发生偏转。左右翅尖的坐标曲线的峰值有相位差，这个不对称的拍动到底在其中贡献的比例如何，有待于进一步研究。

过去对悬停和前飞过程的拍动轨迹都是规则的正弦曲线，没有出现一大一小两个波相的情况，对于大小曲线波相间的作用，我们对照图 2.13 作如下分析，在图 2.13A 中出现的小波曲线的振幅都比较小，其主导作用的仍然是大振幅的正弦曲线。但是 B 中 50ms 以后的几次振荡曲线却小波曲线明显增大，而大波曲线振幅却减小。可以猜想，如果小波振幅继续增大可以主导飞行的受力。基于此，认为在自由飞行过程应该是一系列波的叠加，小波对飞行的姿态起微调的作用来达到控制身体姿态的调整和平衡性。大小波在一定的条件下相互转换。当小波主导的时候大波变成了小波，与原先的曲线相比，形成相位差。相位差导致拍动不平衡。受力不平衡。所以认为正是由于苍蝇可以快速地改变拍动的相位差来达到机动飞行的。

从稳定性角度来说，拍动轨迹得波动曲线其实就是一种不稳定波动，每个波都有可能增大或者减小。而改变一个波动的相位需要的时间却很少，基本都是 $1/3-1/4$ 个拍动周期。这样可以在极短的时间内形成扭矩，来调整姿态。由于以上处理的转弯程度不大，我们又对几个不同的活体的机动飞行过程做了分

析, 如图 2.15 中图 ADFINQRTU, 都是明星的左右不对成拍动, 摄影慢速播放显示的是一个左右摇摆过程。发现转过程的翅膀拍动的不对称性特别明显, 其翅膀的拍动相位差更大, 一些时候两个翅膀的在水平拍动都是反向。基于此, 我们认为, 相位差对转弯有很大的贡献, 具体量化关系需要进一步研究。

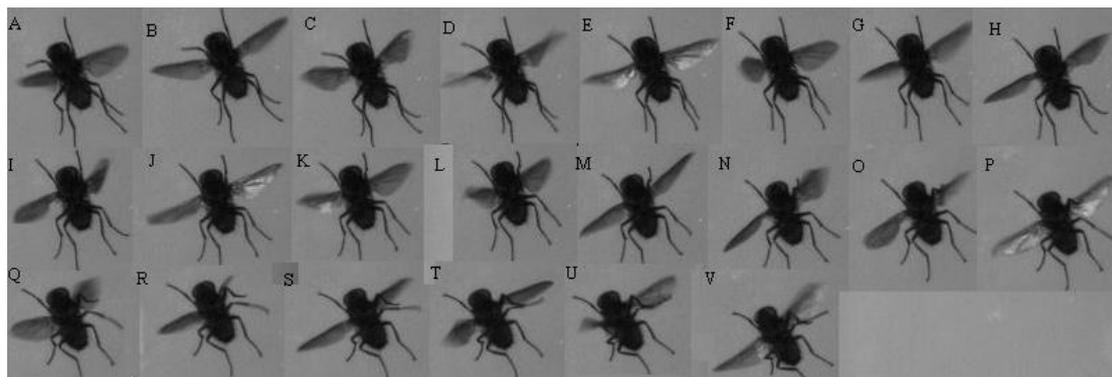


图.2.15 .不对称拍动动作

Fig.2.15 Unsymmetrical flapping motion

2.4 结论

考虑转弯过程的两翅膀参数的影响, 可以看出, 频率在转弯过程基本没有影响, 统计翅膀的拍击频率可以看出, 两个翅膀在转弯过程大致相同。而竖直方向的振幅则出现不对称现象, 向右转弯过程的左翅膀转前幅度明显大于右翅, 转弯完成后右翅的幅度大于左翅, 而且通过将三维拍动轨迹分解在三个方向可以看出, x , y 方向的拍动轨迹是由一大一小两个正弦曲线相间构成, 其中出现了左翅大振幅曲线的波峰和右翅膀小振幅曲线波谷相对应发生。右边同样如此, 出现比较规则。两个翅膀的转弯过程拍动相位差的出现应该对转弯起相当的作用。基于此我们认为是两翅膀的振幅和相位差的出现对转弯贡献作用。

参考文献:

[1] Shyy W, Berg M, Ljungqvist D. Flapping and flexible wings for biological and micro air

- vehicles[J], *Progress in Aerospace Sciences*, 1999, 35: 455~505
- [2] Zeng Jiyong, Su Xianyu. A new rectification method of stereo pairs without calibration for cameras[J], *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 628~632(in Chinese)
曾吉勇, 苏显渝. 一种无相机标定的立体图像对校正新方法[J], *光学学报*, 2004, 24(5): 628~632
- [3] Willmott A. P., Ellington C. P.. The mechanics flight in the hawk moth *Manduca Sexta*. I. Kinematics of hovering and forward flight[J], *J Exp Biol*, 1997, 200, 2705~2722
- [4] Askew G. N.. The mechanical power output of the flight muscles of blue-breasted quail (*Coturnix chinensis*) during take-off(J), *J Exp Biol*, 2001, 204, 3601~3619
- [5] Fry S N., Sayaman R., Dickinson M H.. The Aerodynamics of free-flight maneuvers in *Drosophila*[J], *Science*, 2003, 300: 495~498
- [6] Sane S P.. The aerodynamics of insect flight[J], *J Exp Biol*, 2003, 206: 4191-4208
- [7] Jia Dongyao, Ding Tianhuai. A Novel Method for Dynamic Calibrating Non-Uniform of Multiple CCD Imaging[J], *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(4): (in Chinese)
郑东耀, 丁天怀. 多路 CCD 成像非一致性动态校正新方法[J], *光学学报*, 25(4):
- [8] Van Den Berg C.. A quantitative, three-dimensional method for analyzing rotational movement from single-view movies[J], *J Exp Biol*, 1994, 191, 283~290
- [9] Liu Zhangwen, Gu Tianxiang. Three-dimensional measurement of object by using gray gradient of CCD image[J], *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(11): 1384~1388 (in Chinese)
刘章文, 古天详. 利用 CCD 图像的灰度梯度实现物体三维测量[J], *光学学报*, 23(11): 1384~1388
- [10] Dudley R, Ellington C P. Mechanics of forward flight in bumblebees, I. Kinematics and morphology(J), *J Exp Biol*, 1990, 148: 19~52
- [11] Willmott A P, Ellington C P.. Measuring the attack of beating insect wings: Robust three-dimensional reconstruction from two-dimensional images[J], *J Exp Biol*, 1997,

200: 2693~2704

[12] Lijiang Zeng, Qun Hao and Keiji Kawachi, Measuring the body vector of a free flight bumblebee by reflection beam method[J], Meas. Sci. Technol. 2001, 12, 1886~1890

[13] Wang H, Zeng L J., Liu H., et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies[J]., J Exp Biol, 2003, 206: 745~757

[14] Zeng L J., Matsumoto H., Kawachi K.. A fringe shadow method for measuring flapping angle and torsional angle of a dragonfly wing[J], Meas Sci Technol, 1996, 7: 776 ~781.

[15] Schilstra C., Van Hateren J H.. Blowfly flight and optic flow. I. Thorax kinematics and flight dynamics[J]. J Exp Biol, 1999, 202: 1481~1490.

[16] Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision, Beijing: Science press [M], 1998, 72~75(in Chinese)

马颂德, 张正友. 计算机视觉., 北京: 科学出版社[M], 1998, 72~75

[17] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330~1334

[18] Lance F. Tammmero, Michael H. Dickinson.. The influence of visual landscape on the free flight behavior of fruit fly *Drosophila melanogaster*[J], J Exp Biol, 2002, 205, 327~343

第三章 数值模拟

3.1 引言

按定常空气动力学理论，昆虫难以提供克服自身重量的升力而飞行，而事实上，昆虫不仅可以自由飞行，还能够轻松实现快速启动悬停、倒飞等机动飞行。揭示昆虫的飞行奥秘对微型飞行器的设计有着重要意义。

较早的昆虫飞行研究以实验为主。昆虫吊飞配合烟气流场进行可视化测量[1][2]是昆虫飞行实验中较为成功的方法，这种方法可以直观得到昆虫飞行可视化流场以及飞行总动力，但不能获得每个翅膀上的具体气动力特性。为了得到翅膀上较为详细的瞬时气动力，研究者们根据相似性原理，加工出昆虫机械翅进行动态模拟测量[3][4][5][6][7]，应用这种方法，成功揭示了昆虫翅膀产生高升力的部分机理：失速延迟(或前缘涡不脱落)，俯仰旋转环量，尾涡捕获[4][5]。

随着动态网格数值方法的逐步完善，计算流体动力学成为研究昆虫飞行非定常气动力学和你翼展流对升力的影响[8]，蜻蜓二维悬停的高升力机理[9][10]，蜻蜓前后翼相互干扰下的气动力特性[11]，果蝇翅膀的非定常流动[12]，并且基于计算结果和实验数据的对照总结出了产生高升力的若干机制。另外，近几年也有研究者开始尝试数值研究翅膀柔性变形对气动力学特性的影响[13]。

值得指出的是，目前绝大多数数值研究是在直线拍动轨迹下进行的，而实际中的许多昆虫翅膀拍动轨迹并非直线，普遍存在横向偏移运动，为了研究横向偏移对飞行特性的影响，本文计算比较了几种拍动轨迹(直线、椭圆、“8”字)下的升阻力特性(关于拍动轨迹的定义参见下一节中的翅膀运动函数描述)。同时，本文还模拟研究了另外两个对飞行气动力特性有重要影响的参数：翅膀俯仰转轴位置和俯仰转动模式。为了探索昆虫抗干扰飞行的奥秘，本文还对阵风中飞行的蜻蜓

翅膀升阻力特性进行了初步计算。

事实上，昆虫飞行气动力的数值模拟是一个复杂的非定常、外流场、边流场区域计算问题，直接模拟其三维运动是一项很具有挑战性的工作[14][15]。一种比较易于操作的方法就是把三维问题简化为二维问题来处理。二维计算虽然不能考虑三维效应，但它节省了计算时间，排除了过多参数的影响，有利于集中研究若干主要参数对气动力特性的影响。本文即是如此简化处理的。

3.2 问题描述

蜻蜓飞行具有惊人的机动性和稳定性，但它飞行时的翅膀拍动频率却只有几十赫兹，相对于其它昆虫较低，适合作为仿生微型飞行器的设计参考。因此本文选择蜻蜓作为研究对象。

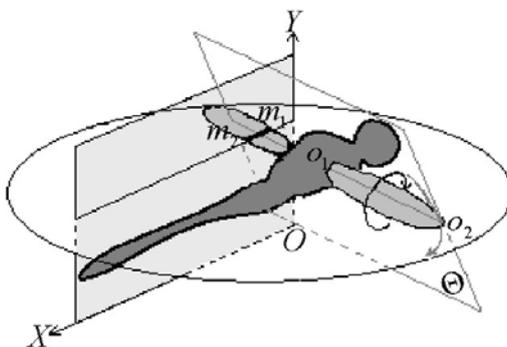


图 3.1 蜻蜓翅膀运动示意图

Fig3.1 moving path of dragonfly's wings

如图 3.1 所示(为了清晰起见，图中只画出蜻蜓的一对前翅)，蜻蜓翅膀做空间复合运动：绕自身体轴上下拍动的同时还绕翼展轴线(右翅绕 O_1O_2 线)做俯仰转动(即不断改变翅膀攻角)，而且上下拍动过程中，翅膀不完全保持在拍动平面 Θ 内，存在着横向偏移运动(即翅膀按照特定频率前后偏移摆动，周期性的偏离 Θ 平面)。为了简化计算，鉴于蜻蜓翅膀的展弦比较大 [16][17][18]，本文忽略三维效

应, 仅计算蜻蜓翅膀展向横截面(即弦向切面, 图 3.1 中的截面 m_1m_2) 在二维流场中运动的气动力特性。严格讲, 横截面 m_1m_2 的拍动轨迹是一弧面, 弧心在翅膀根部, 在二维计算中把此弧面近似作为平面处理, 认为 m_1m_2 运动保持在 XOY 平面内(OX 为水平方向, OY 为竖直方向)。

取出图 3.1 中的 XOY 平面, 对翅膀截面 m_1m_2 的运动作详细分析(图 3.2 示)。本文假设翅膀截面 m_1m_2 为椭圆型, 翅膀弦长 $chord$ 为椭圆长轴的两倍, 翅膀厚度为椭圆短轴的两倍。在 XOY 内建立一个局部坐标系 xoy , 原点 o 位于翅膀拍动轨迹线的中点, x 轴位于拍动平面 Θ 内, y 轴垂直于拍动平面。二维情况下, 翅膀的运动可以描述为基点平动和绕基点转动的复合。基点即为翅膀转动轴, 这里取为翅膀的形心, 即椭圆 m_1m_2 的圆心, 距离翼前缘 $0.5c$ 。翅膀在 x 方向的运动代表三维飞行中的上下拍动, 翅膀在 y 方向上的运动代表三维飞行中的横向偏移运动, 翅膀攻角的改变对应于三维飞行中的俯仰运动。二维情况下, 通常把翅膀的上下拍动称为平动(包括横向偏移运动), 把改变翅膀攻角的俯仰运动称为转动。本文翅膀运动函数具体描述如下[9](参见 Wang 2000, 为了考虑不同拍动轨迹对飞行气动力的影响, 本文增加了横向偏移运动函数):

翅膀平动位移表达式(即基点的运动)为:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} \cos(2\pi f_0 t) \quad (\text{上下拍动}) \quad (3.1)$$

$$y(t) = \frac{B_0}{2} \sin(2\pi f_1 t) \quad (\text{横向偏移}) \quad (3.2)$$

翅膀转动表达式(即攻角的变化)为:

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (3.3)$$

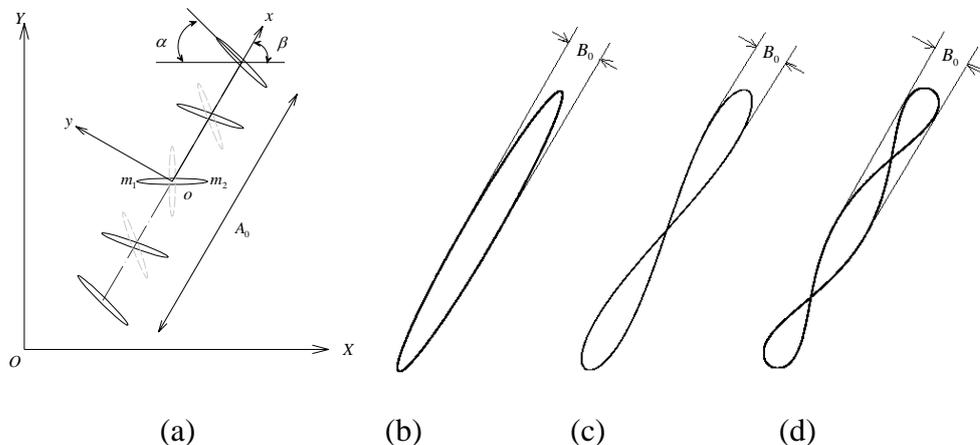


图 3.2(a)直线拍动轨迹，一个周期内不同时刻翅膀位置示意图。实椭圆表示下拍阶段的翅膀位置，虚椭圆表示上提阶段的翅膀位置。 XOY 为地球坐标系， xoy 为局部坐标系(原点位于拍动轨迹中点)。 A_0 为拍动幅值， B_0 为横向偏移幅值， α 为翅膀攻角，是翼弦与水平面的夹角， β 为拍动平面角，是翅膀转动轴轨迹线与水平面的夹角。(b)椭圆拍动轨迹。(c)“8”字型拍动轨迹。(d)双“8”字型拍动轨迹。

Fig3.2 (a) The wing positions at different times over a full flapping cycle for the translational flapping trajectory. The solid ellipse represents the positions at downstroke stage while the dashed ellipse represents positions at upstroke stage. XOY is the world coordinate system while xoy is the local coordinate system with the center point located on the center of the flapping trajectories. A_0 , the flapping amplitude; B_0 , the horizontal deviation amplitude c , the chord length; α , the wing attack angle regarding the angle between the wing chord and the horizontal plane; β , the flapping plane angle regarding the angle between the wing rotation trajectory and the horizontal plane. (b) The ellipse flapping trajectory. (c) The figure-eight flapping trajectory.(d) The double-figure-eight flapping trajectory.

本文翼型为椭圆型， $c = 1cm$ ， $A_0 = 2.5cm$ ， $f_0 = 40Hz$ ， $\beta = \pi/3$ (依据蜻蜓飞行参数，具体参见[8][16][17][18][19]。若无特别说明，翅膀厚弦比 $h/c=1/20$ 。本章将对参数 B_0 、 f_1 、 φ 以及转动轴位置对飞行气动力特性的影响展开讨论。

若 $B_0 = 0$ ，则为直线拍动，运动函数和 Wang(2000)[9]的相同(图 3.2(a)); 若 $B_0 \neq 0$ ，则根据 f_1 的变化，有不同的拍动轨迹： $f_1 = f_0$ 为椭圆型拍动轨迹(图 3.2(b))， $f_1 = 2f_0$ 为“8”字型拍动轨迹(图 3.2(c))， $f_1 = 3f_0$ 为双“8”字型拍动轨迹(图 2(d))。若 $\varphi > 0$ ，则称为超前转动模式；若 $\varphi = 0$ ，则称为对称转动模式；若 $\varphi < 0$ ，则称为滞后转动模式。本文算例中，气体密度 $\rho = 1.225 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ，动力粘性系数设为 $\mu = 2.45 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (此处流体粘性大于空气的真实粘性，是为了研究较小雷诺数下的运动特性，也是为了方便与 Wang 2000[9]中数据对比)，因此雷诺数 $\text{Re} = \frac{V_{\max} c}{\nu} = 157$ 。

3.3 控制方程及求解

本文计算模型是非定常二维 2D 层流不可压外流场，此模型的质量和动量方程可以如下描述：

$$\frac{\partial u}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial Y} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Y^2} \right) \quad (3.6)$$

但由于翅膀在空间位置随时间不断变化，导致所要计算的流场区域不断变化，单元控制体也随之改变。每计算一个时间步，网格需要重新划分。为了保证守恒性，

上述质量和动量方程中必须考虑网格移动带来的影响。引入变量网格移动速度 \vec{V}_g ，则质量和动量方程可以如下描述(积分型控制方程)：

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho(\vec{V} - \vec{V}_g) \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho u(\vec{V} - \vec{V}_g) \cdot d\vec{A} = \int_{\partial\Omega} \mu \nabla u \cdot d\vec{A} + \int_{\Omega} \left(-\frac{\partial p}{\partial X} \right) d\Omega \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho v d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho v(\vec{V} - \vec{V}_g) \cdot d\vec{A} = \int_{\partial\Omega} \mu \nabla v \cdot d\vec{A} + \int_{\Omega} \left(-\frac{\partial p}{\partial Y} \right) d\Omega \quad (3.9)$$

进而写成通用标量 ϕ 的守恒型积分控制方程：

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \phi(\vec{V} - \vec{V}_g) \cdot d\vec{A} = \int_{\partial\Omega} \mu \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_{\Omega} S_{\phi} d\Omega \quad (3.10)$$

其中 Ω 是边界不断移动的控制体， $\partial\Omega$ 表示控制体边界。当 $\phi = 1$ 时，即为质量守恒方程，当 $\phi = u$ 和 $\phi = v$ 时，即为动量守恒方程。

每个时间步下网格都进行重新划分，一旦确定了 n 时间步网格和 $n+1$ 时间步重新划分的新网格，就可知全场的网格速度 \vec{V}_g 和控制体积 Ω^n 及 Ω^{n+1} 。 $n+1$ 时间步网格节点上的 n 时间步的物理量值可以通过 n 时间步网格节点上的物理量值插值得到。这样，方程(3.10)的时间偏导项一阶向后差分式(3.11)中的变体积问题和方程(3.10)的对流项中的网格移动速度问题均得到解决。

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega = \frac{(\rho \phi \Omega)^{n+1} - (\rho \phi \Omega)^n}{\Delta t} \quad (3.11)$$

所以对于本文所研究的二维扑翼运动，依然是三个方程(质量方程(3.7)，两个动量方程(3.8)(3.9))三个未知数(u, v, p)，方程封闭。给定初始条件和边界条件，即可求解。

3.4 初始条件和边界条件

计算流场区域如图 3.3 所示, 翅膀是流场内边界, 视为可移动墙边界条件内边界墙的速度函数可以通过对(3.1)(3.2)(3.3)式求导并向 XOY 坐标系中 X 、 Y 轴分解、迭加得到:

$$u(t) = -A_0\pi f_0 \sin(2\pi f_0 t) \cos \beta - B_0\pi f_1 \cos(2\pi f_1 t) \sin \beta \quad (3.12)$$

$$v(t) = -A_0\pi f_0 \sin(2\pi f_0 t) \sin \beta + B_0\pi f_1 \cos(2\pi f_1 t) \cos \beta \quad (3.13)$$

$$\omega(t) = \frac{\pi}{2} \pi f_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (3.14)$$

上述表达式即为计算区域内边界条件, 外边界条件设压强为零(环境压强设为一个大气压)。取表达式(3.12)(3.13)(3.14)中 $t = 0$ 得到内边界速度初始条件:

$$u(0) = -B_0\pi f_1 \sin \beta \quad (3.15)$$

$$v(0) = B_0\pi f_1 \cos \beta \quad (3.16)$$

$$\omega(0) = \frac{\pi}{2} \pi f_0 \cos \varphi \quad (3.17)$$

其余区域的速度初始值设为零; 全场初始压强设为零。确定了初始条件和边界条件, 采用 SIMPLEC, 二阶迎风格式求解方程(3.10)(即方程(3.7)(3.8)(3.9))。

3.5 计算可信性验证

理论上, 外流场计算问题的外边界在无穷远处, 但实际数值计算只能取有限场, 为了考虑计算流场区域尺寸效应, 本文比较了几种不同区域尺寸(外边界边长分别为 $5c$, $10c$, $15c$, $20c$)下的计算结果, 事实表明, 当外边界尺寸大于 $10c$ 时, 计算结果基本不再受区域尺寸的影响。另一个需要考虑的因素是网格质量, 本文对此也作了数值实验, 结果表明, 选择适当的网格重划参数, 可以使得网格在翅膀附近高密度, 而在较远处比较稀疏(图 3.3)。这样既实现了详细捕捉翅膀

附近的流场信息，又减少了计算量，并且较好的保证了网格重划过程中单元控制体变化较为平稳，有利于避免数值抖动。总网格数保持在 4 万个单元左右即可满足计算要求，为了便于每一个新时间步网格重划，本文选择了三角形单元(图 3.3)。

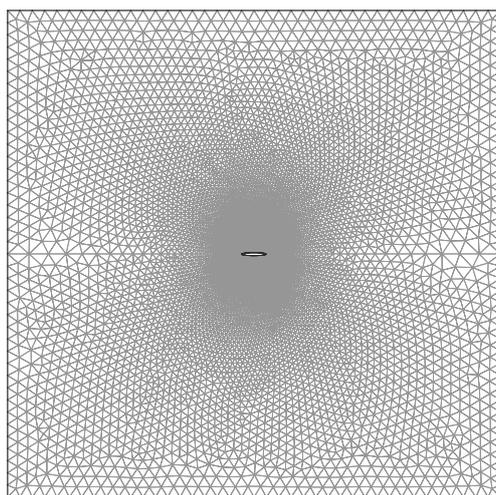


图 3.3 典型算例全场计算区域网格。

Fig 3.3 Mesh in computational region

为了说明此数值方法研究昆虫飞行气动力的可行性，本文依照 Wang(2000)[9]的翅膀运动函数作了计算，但其论文中没有明确说明椭圆翅膀的厚弦比，本验证算例选择了厚弦比 1/8。本算例经过十多个翅膀拍动周期的计算，升阻力达到稳定的周期性变化，计算结束。图 3.4 对本文和 Wang(2000)[9]的计算结果作了比较，从图中可以看出两者所得升阻力曲线随时间的变化趋势极为相似，只是幅值稍微不同，幅值的不同可能是由于两者计算中所选用的翅膀厚弦比不同引起的。图 3.4 中升力是指翅膀运动产生合力在竖直方向(Y 轴)上的分量，沿 Y 轴正方向为正；阻力是指翅膀运动产生合力在水平方向(X 轴)上的分量，沿 X 轴正方向为正，负的阻力表示推力，比如昆虫前飞过程中一个周期内产生的平均阻力小于零，即说明昆虫受到向前的推动力。求出一个周期内的二维平均升力和推力(即单位翼展上的受力)分别为：0.034N/m 和 0.018N/m。我们假设蜻蜓翅膀为椭圆形，典型蜻蜓翅膀长 5cm,宽 1cm,则两对翅膀产生的平均升力为：0.0053N,而典型蜻蜓

重量介于 0.001N~0.0025N[9][15][16][17][19], 总升力大于蜻蜓体重, 所以蜻蜓不仅能够正常飞行, 还具有非常优秀的机动飞行能力。这一结果从另一个角度验证了本文数值计算的可信性。

为了方便研究, 本文讨论过程中应用升阻力、推力和力矩系数的概念, 分别定义如下:

$$C_L = \frac{Lift}{0.5\rho\bar{V}^2c} \quad C_D = \frac{Drag}{0.5\rho\bar{V}^2c} \quad C_T = \frac{Thrust}{0.5\rho\bar{V}^2c} = -C_D \quad C_M = \frac{Moment}{0.5\rho\bar{V}^2c^2} \quad (3.18)$$

其中 \bar{V} 是翅膀一个周期内的平均拍动速度, $\bar{V} = 2f_0A_0$ 。

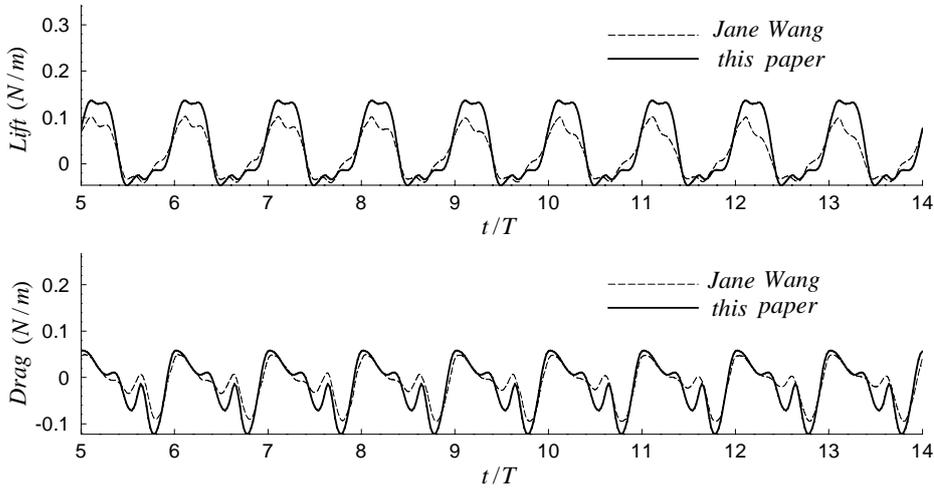


图 3.4 本文算例升阻力曲线与 Jane Wang(2000)[9]升阻力曲线对照。翅膀运动周期 $T=0.025s$ 。

Fig 3.4 Computational results of this paper and Jane Wang

3.6 结果与讨论

3.6.1 一个典型算例的分析

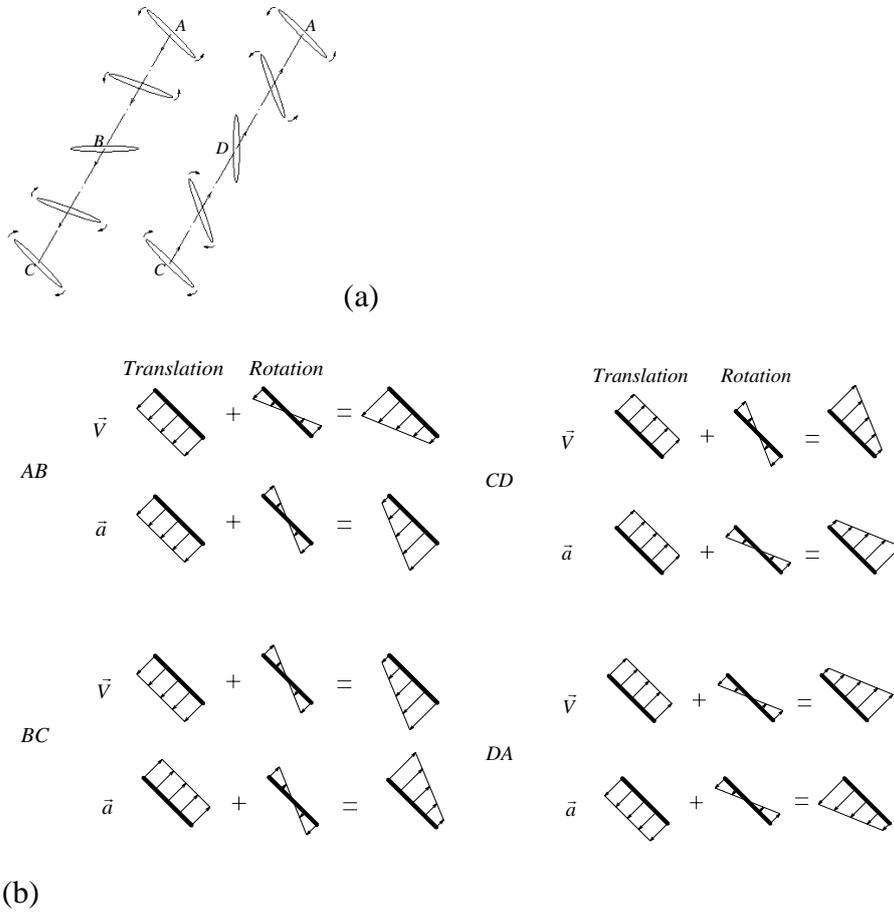
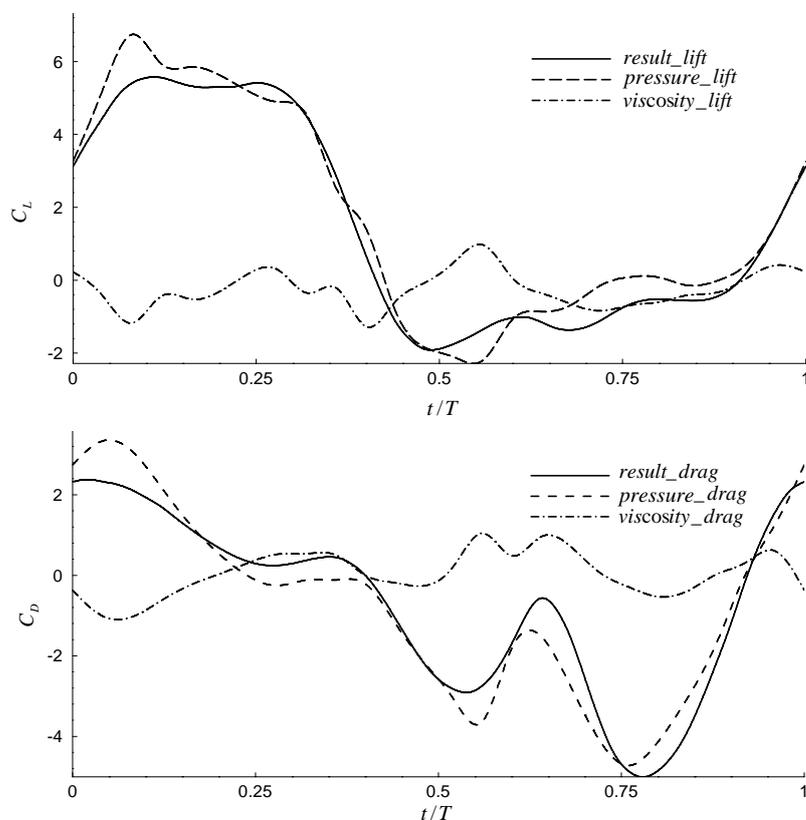


图 5(a)一个周期内不同时刻下的翅膀运动姿态，左为下拍时间段，右为上提时间段。(b)翅膀直线拍动下一个周期内不同时间段的运动速度、加速度合成示意图。 \vec{V} 表示速度， \vec{a} 表示加速度。

Fig 5(a) Several motion in one flapping period, the left one and right one show downstroke and upstroke respectively. (b) Velocity and acceleration in one linear flapping period. \vec{V} means velocity, \vec{a} means acceleration.

本节考虑一直线拍动轨迹($B = 0$)、对称转动模式($\varphi = 0$)、转轴位于翅膀截面形心(距离翼前缘 $0.5c$ 处)的算例，翅膀厚弦比为 $1/8$ ， $t=0.0$ 时刻为下拍开始时刻。图 3.5 给出了一个周期内不同时间段的速度和加速度合成示意图，图 3.6 给出了一个周期内升阻力及力矩变化曲线。

实际上升力由两部分组成：一部分来源于上下翼面的压力差，另一部分来源于粘性剪切力作用。图 3.6 升力曲线图上同时显示了压力差所导致的升力曲线及粘性剪切所导致的升力曲线，压差升力和总升力变化规律一致，几乎重合，这说明压差对升力的影响是决定性的；粘性剪切升力在零值附近波动，对总升力的影响很小，几乎可以忽略。阻力曲线也具有类似的特性。此现象说明，对于 $Re = 157$ 的扑翼飞行，升阻力特性依然由压力差(或者说是非定常惯性力)支配，粘性力的影响极为有限，Wang 曾在论文中提到过这一点，本文在此应用确凿的数据证实了它。值得注意的是流体粘性对力矩的影响非常明显，力矩曲线图显示(图 3.6)，流体粘性对力矩的作用效果不亚于压差作用。在 $t=0.0T$ 和 $t=0.5T$ 附近，压差力矩和粘性力矩较大，而在 $t=0.25T$ 和 $t=0.75T$ 附近，压差力矩和粘性力矩较小，这说明压差力矩和粘性力矩都主要是由旋转所致，但两者方向正好相反,因此整体合力矩较小。



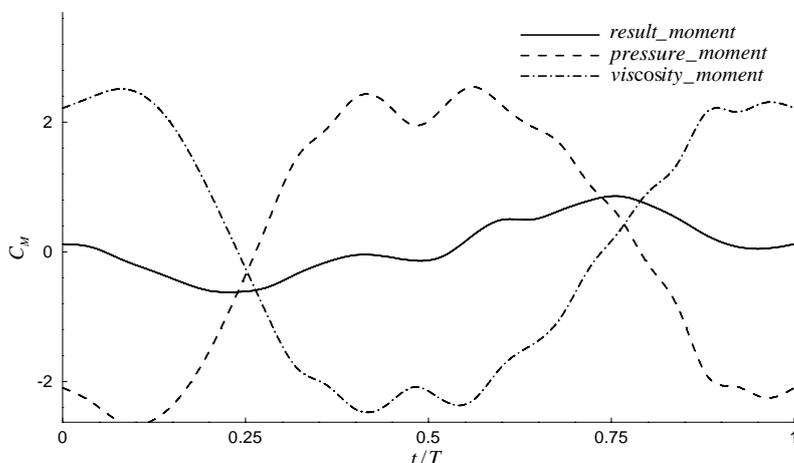


图 3.6 典型算例(直线拍动)一个周期内的升阻力和力矩曲线, 以及相应的压差升阻力、力矩和粘性升阻力、力矩曲线。

Fig3.6 A typical example of linear flapping during one period, the figure shows lift, drag, pressure difference, moment curve.

平均升阻力体现出力的作用效果, 通过一个周期内的积分平均得到本算例的平均升力系数为 1.46, 平均阻力系数为-0.75, 平均力矩系数为 0.077。在定常情况下最大升力系数约为 1.0[19], 可见非定常运动产生了高升力。平均力矩系数远小于平均升阻力系数, 这说明蜻蜓飞行能耗主要用于克服升阻力, 改变翅膀攻角的运动几乎不耗费能量, 但改变攻角却是改变升阻力的有效方法(这一点将在下面的几个小结中得到论证)。通过灵活改变攻角来实现微型飞行器的机动飞行将是不错的选择。

下面从运动学角度具体分析翅膀拍动过程中的受力特点。由于是非定常运动, 分析过程中必须考虑加速度效应, 即非定常流动的附加质量效应。

由翅膀运动函数可知, 下拍过程的 AB 段, 即 $t=0.0T\sim 0.25T$ 时间段, 翅膀沿拍动平面向左下加速平动, 逆时针减速转动。速度合成表明(图 3.5b-AB), 速度瞬心后移, 翅膀以加速推动气体向左下方运动为主, 翅膀受到气体对它的反作用力, 此力来源于两部分:一部分是由于速度引起的阻力, 和运动方向相反, 因此方向

为右上方；另一部分是由于加速度引起的惯性力，翅膀使气体得到向左下的加速度(迫使气体向左下加速运动)，则其本身一定受到向右上方的反作用力。所以此时间段翅膀所受升力和阻力均为正(看图 3.6)。

下拍过程的 BC 段，即 $t=0.25T\sim 0.50T$ 时间段，翅膀沿拍动平面向左下减速平动，顺时针加速转动。速度合成表明(图 3.5b-BC)，速度瞬心前移，翅膀以减速推动气体向左下方运动为主，翅膀受到气体对它的反作用力，此力来源于两部分：一部分是由于速度引起的阻力，和运动方向相反，因此方向为右上方；另一部分是由于加速度引起的惯性力，翅膀使气体得到向右上的加速度(迫使气体向左下减速运动)，则其本身一定受到向左下方的反作用力。因此，此时间段翅膀所受升力和阻力可能为正，也可能为负，取决于上述两种力谁占主导地位。BC 段的初始时间，翅膀下拍速度很大，而加速度较小，所以速度引起的阻力大于加速度引起的惯性力，力的总体作用效果表现为正升力和正阻力(看图 3.6)；随着下拍速度的减小、加速度的增大，速度引起的阻力减小，加速度引起的惯性力增大，力的总体作用效果逐渐变为负升力和负阻力(看图 3.6)。

上提过程的 CD 段，即 $t=0.50T\sim 0.75T$ 时间段，翅膀沿拍动平面向右上加速平动，顺时针减速转动。速度合成表明(图 3.5b-CD)，速度瞬心后移，翅膀以加速推动气体向右上方运动为主，翅膀受到气体的反作用力，此力来源于两部分：一部分是由于速度引起的阻力，和运动方向相反，因此方向为左下方；另一部分是由于加速度引起的惯性力，翅膀使气体得到向右上方的加速度(迫使气体向右上方加速运动)，则其本身一定受到向左下方的反作用力。因此，翅膀此时间段所受升力和阻力均恒为负值(看图 3.6)。

上提过程的 DA 段，即 $t=0.75T\sim 1.0T$ 时间段，翅膀沿拍动平面向右上方减速平动，逆时针加速转动。速度合成表明(图 3.5b-DA)，速度瞬心前移，翅膀以减速推动气体向右上方运动为主，翅膀受到气体的反作用力，此力来源于两部分：一部分是由于速度引起的阻力，和运动方向相反，因此方向为左下方；另一部分

是由于加速度引起的惯性力，翅膀使气体得到向左下方的加速度(迫使气体向右上方减速运动)，则其本身一定受到向右上方的反作用力。因此，翅膀此时间段所受升力可能为正，也可能为负，取决于上述两种力谁占主导地位。DA段的初始时间，翅膀上提速度很大，而加速度较小，所以速度引起的阻力大于加速度引起的惯性力，力的总体作用效果表现为负升力和负阻力(看图 3.6)；随着上提速度的减小、加速度的增大，速度引起的阻力减小，加速度引起的惯性力增大，力的总体作用效果逐渐变为正升力和正阻力(看图 3.6)。

以上分四个拍动阶段从运动学的角度对升阻力特性进行了定性分析，分析结果和实际计算结果吻合，这说明从运动学角度分析翅膀气动力特性是可行的。下面我们再从涡动力学的角度并结合瞬态压强场对升阻力特性做进一步分析(对照图 3.6、图 3.8 的第 1、3 列)。

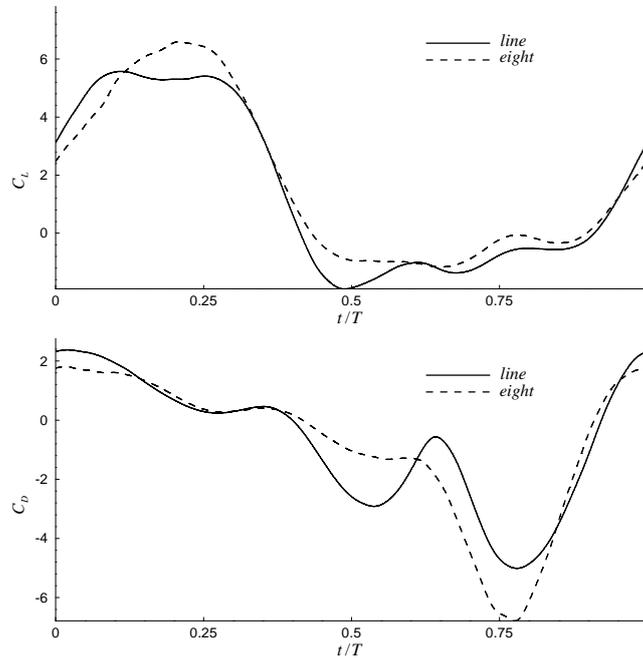


图 3.7 直线拍动轨迹和“8”字拍动轨迹下的升阻力、力矩曲线，翅膀拍动横向偏移量为 $\frac{A_0}{10}$ 。

Fig 3.7 lift, drag and moment curve of linear and figure “8” at the offset $\frac{A_0}{10}$.

下拍平动加速阶段，升力系数由 $t=0.0T$ 时刻的 3.1 迅速增加到 5.5($t=0.12T$)，然后一直保持着高升力到 $t=0.25T$ 时刻，阻力系数则比较平稳的由 2.4 逐渐降低到 0.3。 $t=0.0T$ 时刻，翅膀开始启动下拍，远离翅膀的下方有一对涡偶极子(图 3.8-1A)，左边涡顺时针旋转，右边涡逆时针旋转，两个涡相互促进快速下移远离翅膀，此涡偶极子是前一周期的脱落涡。另外，在翼前缘上翼面开始有顺时针启动涡形成，这使得上翼面形成低压区(图 3.8-3A)，因此升力为正。随着翅膀的加速下移，翼前缘顺时针涡不断积聚变大(图 3.8-1B、1C)，翼后缘上翼面开始形成逆时针涡，这使得上翼面的低压区越来越大(图 3.8-3B、3C)，上下翼面越来越大的压力差产生了越来越高的升力，在 $t=0.25T$ 时刻升力系数高达 5.5。导致升力增加的另一因素是此时间段翅膀攻角不断变小(由 $t=0.0T$ 时的 45° 逐渐减小为 $t=0.25T$ 时的 0°)，使得上下翼面压力差合力方向逐渐接近竖直，在竖直方向的分量增大。另外翅膀攻角不断变小，因而在水平方向上的分量不断减小，这正是阻力不断减小的原因。

下拍平动减速阶段，升力系数由 5.4 不断下降，在接近 $t=0.5T$ 时达到最大负升力系数-1.9,阻力系数先是保持在 0.3 左右的平稳状态，在 $t=0.375T$ 附近开始加速下降到-2.6($t=0.5T$)。此时间段，翼后缘逆时针涡开始拉长远离上翼面(图 3.8-1D)，这使得上翼面压强回升(图 3.8-3D)，升力下降。在 $t=0.5T$ 时刻附近，翼后缘逆时针涡开始脱落，同时由于翅膀的高速旋转，在翼前缘的下翼面开始有逆时针涡形成(图 3.8-1E)，这使得上翼面翼后缘压强升高而下翼面翼前缘压强降低(图 3.8-3E)，因此升阻力不断下降，甚至出现负的升阻力。

上提平动加速阶段，升力变化缓慢，而阻力变化较大，阻力系数先由-2.8 左右上升到-0.6($t=0.625T$)，然后又迅速降低到-4.9。在 $t=0.625T$ 时刻附近，翼后缘逆时针涡彻底脱落，翼前缘顺时针涡先覆盖上翼面然后逐渐从翼后缘脱落，同时，在

翼前缘下翼面的逆时针涡逐渐增大(图 3.8-1F), 这使得翼上缘经历了先低压然后迅速升高的过程(图 3.8-3F), 导致了阻力的先升高后迅速降低(即推力的先降低后升高)。而升力变化不大, 这是因为翅膀接近于垂直状态(攻角接近于 90°), 合力在竖直方向上的分量较小。

上提平动减速阶段, 升力先缓慢增加, 在 $t=0.90T$ 时刻附近开始迅速上升, 在 $t=1.0T$ 时刻升力达到 3.1; 阻力也迅速回升, 在 $t=1.0T$ 时刻, 迅速达到 2.3。此时间段, 翅膀的减速运动使得上翼面压强不断降低, 翅膀逆时针加速转动促使已脱离的前缘涡和后缘涡形成涡偶极子(图 3.8-1H、1A), 快速远离翅膀而下移, 最后发展到 $t=0.0T(t=1.0T)$ 时刻所描述的现象, 上翼面压强逐渐降低, 下翼面压强逐渐升高, 致使升阻力均迅速增加。

从上述分析看出, 升力主要是由翅膀的加速下拍和快速下拍运动产生, 阻力主要是由翅膀的加速上提和快速上提运动产生。翅膀下拍主要产生升力, 上提主要产生推力[8]。而且升阻力的大小和翅膀攻角密切相关, 因为翅膀攻角的变化直接影响到翅膀与来流速度的夹角以及翅膀所受合力在水平方向和竖直方向上的分量大小。翅膀快速或加速下拍过程中尽量保持翅膀处于水平状态(即攻角等于 0°)可以提高升力, 这不难理解: 翅膀推动更多的气流向下快速或加速运动, 必然受到气流对其向上的更大反作用力。翅膀快速或加速上提过程中尽量保持翅膀处于竖直状态(即攻角等于 90°)可以较好的避免负升力的出现, 同时产生较大的推力, 这也可以从气流反作用力的角度得以解释。事实上, 把翅膀运动和船桨划水运动进行类比更容易体会翅膀产生高升力的机理。

3.6.2 几种主要参数对升阻力特性的影响

3.6.2.1 翅膀拍动轨迹的影响

目前多数文献对昆虫飞行的研究局限于直线拍动轨迹, 没有考虑翅膀横向偏

移运动对升阻力特性的影响，而飞行中的昆虫翅膀横向偏移运动是存在的 [6][20][21]。本文就蜻蜓翅膀拍动横向偏移带来的影响作专门研究。随横向偏移拍动频率的不同，翅膀拍动轨迹分为椭圆形拍动、“8”字形拍动和双“8”字形拍动(见前面关于翅膀运动学的描述)。昆虫翅膀一般都比较薄，这里设蜻蜓翅膀厚弦比为 1/20，相位角 $\varphi = 0$ 。

表 3.1 不同拍动轨迹下的平均升阻力系数。 $B_0 = 0.0$ 表示没有横向偏移，即为直线拍动。

Table 3.1 lift and drag efficiency of different flapping path.

		$B_0=0.0$	$B_0=A_0/10$	$B_0=A_0/5$
椭圆	C_L	1.46	1.24	0.98
	C_D	-0.75	-0.93	-0.99
	C_R	1.65	1.55	1.40
“8”字	C_L	1.46	1.76	1.55
	C_D	-0.75	-0.88	-0.87
	C_R	1.65	1.97	1.77
双“8”字	C_L	1.46	1.43	1.11
	C_D	-0.75	-0.79	-0.70
	C_R	1.65	1.64	1.32

计算得到不同拍动轨迹下升阻力曲线的一个共同特征：下拍阶段主要提供升力，上提阶段主要提供推力(图 3.7 只画出直线和“8”字轨迹)。四种拍动轨迹下的最大升力系数峰值都超过了 5，“8”字和双“8”字拍动甚至超过了 6，远远超过稳态下的最大升力值 3.1[19](Okamoto et al,1996)。表 3.1 列出了各种拍动轨迹下一个周期内的平均升阻力系数。当横向偏移量 $B_0 = A_0 / 10$ 时，相对于稳态下的最大升力，椭圆形拍动平均升力增加 24%，“8”字形拍动平均升力增加 76%，双“8”字形拍动的平均升力增加 43%；相对于直线拍动，椭圆和双“8”字拍动的平均升力均小于直线拍动($C_L = 1.46$)，而“8”字拍动所产生的升力和推力却均大于直线拍动。这一结论对微型飞行器的设计很有意义。值得说明的是，对于“8”字拍动并非横向偏移幅值越大越好，而是存在一个最佳值，表 3.1 显示，

幅值 $B_0 = A_0 / 10$ 优于 $B_0 = A_0 / 5$ 。下面对照直线拍动，来分析“8”字形拍动产生高升力和大推力的机理。

从图 3.7 中可以看出，“8”字形拍动平均升力大于直线拍动主要是由于在 $t=0.25T$ 和 $t=0.50T$ 附近“8”字形拍动升力远高于直线拍动升力；“8”字形拍动平均推力大于直线拍动主要是由于在 $t=0.75T$ 附近“8”字形拍动推力远高于直线拍动。在 $t=0.25T$ 时，翅膀处于下拍中点位置，“8”字形拍动在翼前缘和翼后缘的上翼面所形成的涡大于直线拍动所形成的涡(图 3.8-1C、2C)，并且涡基本上处于翅膀的正上方，而直线拍动所形成的涡则向翼后缘偏离，这使得“8”字形拍动的翅膀上下翼面压力差大于直线拍动(图 3.8-3C、4C)，因此升力较大。此时刻阻力差别不大是由于翅膀处于水平方向，合力在 X 轴方向的分量都接近于零。从运动学的角度分析，此时刻，“8”字拍动比直线拍动多了一个横向偏移速度(见图 3.9， $t=0.25T$ 时刻)，导致翅膀合速度方向较接近于竖直向下，速度引起的阻力则较接近于竖直向上，因此产生较大的升力。在 $t=0.50T$ 附近，相对于直线拍动，“8”字拍动多了沿 xoy 坐标系中 y 轴正方向的横向偏移速度，此横向偏移速度减小了翼前缘对上翼面前后缘涡的阻尼作用，使得涡的旋转速度较大，增大了低压区(图 3.8-3E、4E)，因此 $t=0.50T$ 附近，“8”字拍动升阻力大于直线拍动。在 $t=0.75T$ 时，翅膀处于上提中点位置，“8”字拍动在翼上缘(图 3.8-4G 中翼右侧)形成较大的高压区，导致压力差大于直线拍动压力差，所以产生较大的前推力。此时刻两者升力差别不大是由于翅膀处于竖直方向，合力在 Y 轴方向的分量接近于零。从运动学的角度分析，此时刻，“8”字拍动比直线拍动多了一个横向偏移速度(见图 3.9， $t=0.75T$ 时刻)，导致翅膀合速度方向接近于水平，速度引起的阻力较接近于水平向左(沿 X 轴负方向)，因此产生较大的前推力。

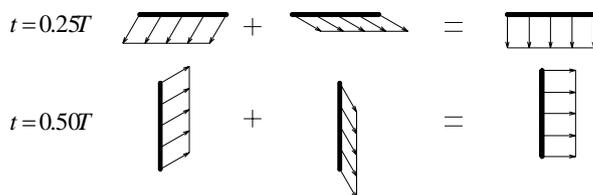


图 3.9 “8”字拍动在 $t=0.25T$ 和 $t=0.50T$ 时刻的平动速度合成图

Fig 3.9 The velocity composition at $t=0.25T$ and $t=0.50T$ for the figure-eight flapping motion of the wing.

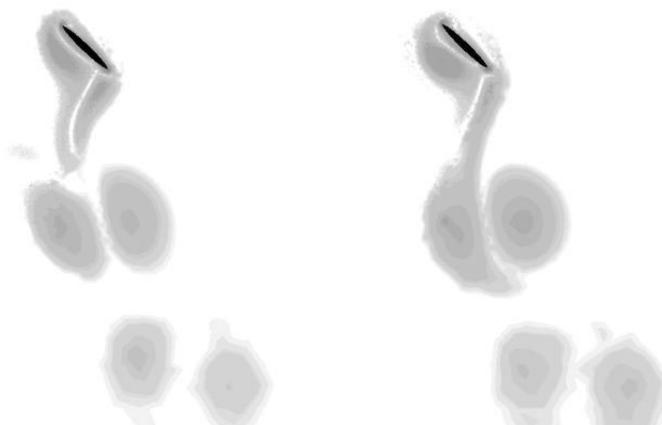


图 3.10 直线拍动轨迹(左)和“8”字拍动轨迹(右)涡街图

Fig3.10 Vortexes of linear and figure “8” flapping paths

无论是直线拍动，还是“8”字拍动，下拍过程中前缘涡一直没有脱落，这使得上翼面的低压区得以保持(图 3.8)，这是产生非定常高升力的机理之一[7][12]。从图 3.8 中的涡量场周期图可以看出，翼前后缘涡的脱落主要是由翅膀的快速旋转和拍动速度的反向所致。各种拍动轨迹下的涡脱落频率一致，一个拍动周期脱落一对涡。图 3.10 显示了直线拍动和“8”字拍动下的涡街图，“8”字拍动的涡街较强于直线拍动。把昆虫和气体视为一个系统，根据动量定理，向下流动的气体越多、速度越大，则昆虫受到的升力就越高，所以“8”字拍动升推力较直线拍动大；而且两者涡街均向右下方脱落，可以推断出昆虫受到的合力(升

推力)方向必是左上方。

3.6.2.2 翅膀俯仰转动轴的影响

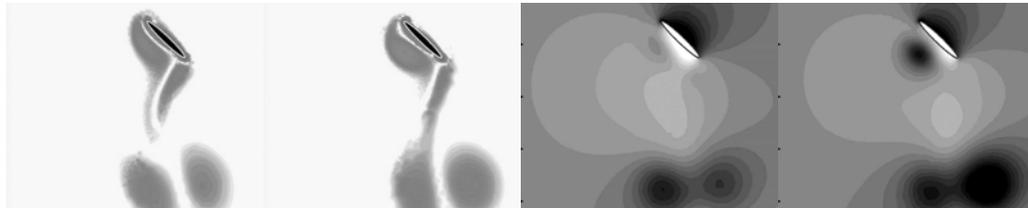
为了研究翅膀拍动的俯仰旋转效应,本文计算了三种不同旋转轴位置下的翅膀拍动,三者的其它参数完全相同:均为直线拍动,厚弦比为 $1/20$,相位角 $\varphi = 0$ 。三种旋转轴分别为距离翼前缘 $0.25c$ 、 $0.50c$ 、 $0.75c$,为了叙述的方便,分别称其为算例 A、算例 B、算例 C.对三个算例一个周期内的升阻力积分平均得到(见表 3.2):算例 A 的平均升力系数为 1.75,而算例 C 的平均升力系数只有 1.50;算例 A 的平均推力系数为 0.88,而算例 C 的平均推力系数只有 0.64,可见旋转轴前移,使得升推力均得到很大提高。

表 3.2 不同旋转轴位置下的平均升阻力系数。case A 距离翼前缘 $0.25c$, case B 距离翼前缘 $0.50c$, case C 距离翼前缘 $0.75c$ 。

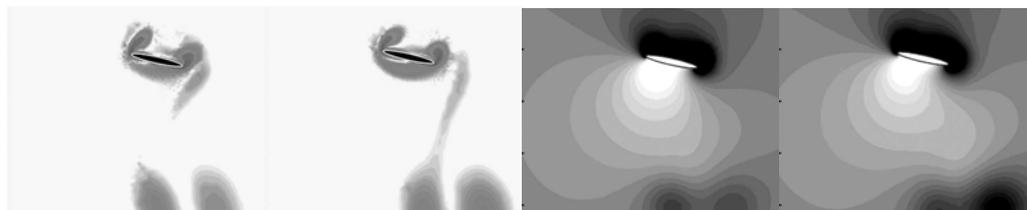
Table 3.2 Lift and drag coefficient of different roll axis.

	C_L	C_D	C_R
case A	1.75	-0.88	1.95
case B	1.58	-0.83	1.79
case C	1.50	-0.64	1.62

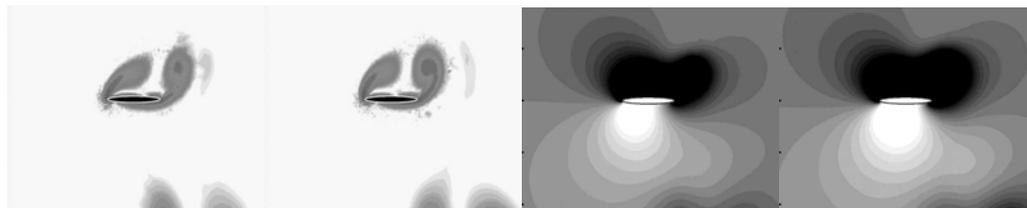
(A) $t=0.0T(t=1.0T)$



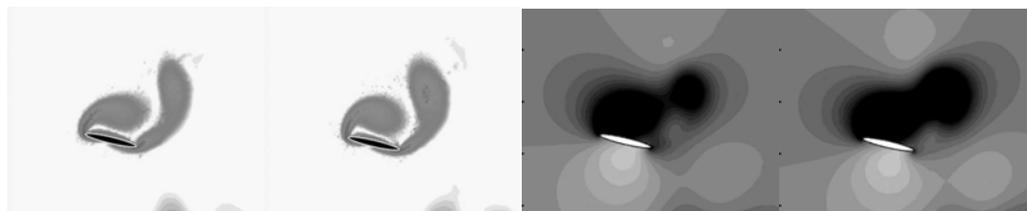
(B) $t=0.125T$



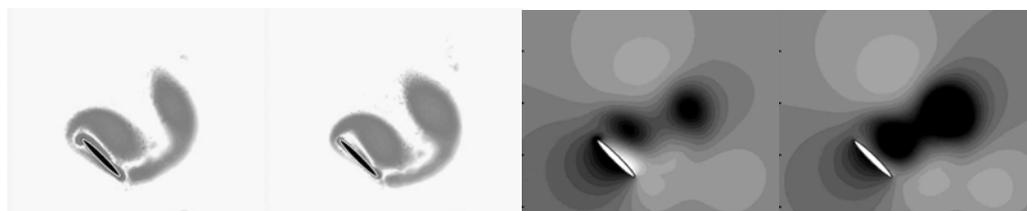
(C) $t=0.25T$



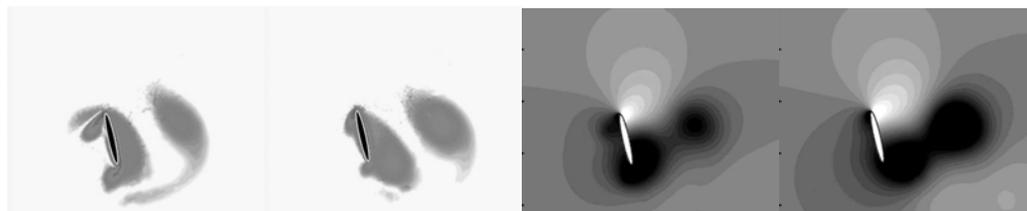
(D) $t=0.375T$



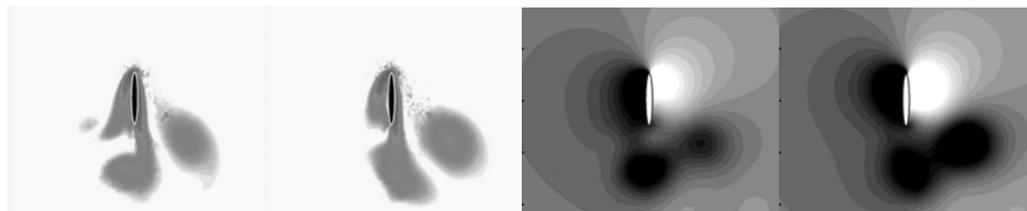
(E) $t=0.5T$



(F) $t=0.625T$



(G) $t=0.75T$



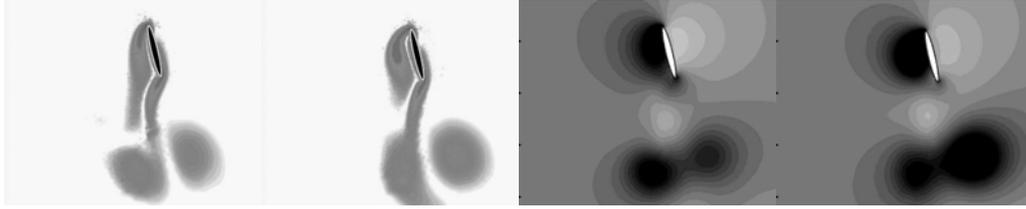
(H) $t=0.875T$ 

图 3.8 一个周期内不同时刻直线拍动和“8”字拍动轨迹下的涡量和压强比较图。第一列为直线拍动轨迹涡量图，第二列为“8”字拍动轨迹涡量图，第三列为直线拍动轨迹压强图，第四列为“8”字拍动轨迹压强图。压强图中白色表示高压，黑色表示低压。

Fig 3.8 Comparisons of the vortices and pressure counters for the translational and figure-eight flapping trajectories. The first and second columns are the vortices for the translational and figure-eight flapping trajectories respectively. The third and fourth columns are the pressure counters for the translational and figure-eight flapping trajectories. The white color represents the high pressure while the black represents the low pressure.

Dickinson(1999)[5]

通过马格纳斯效应解释了翅膀旋转所产生的升力峰值，但马格纳斯效应不能够解释阻力的产生[12]。本文试图直接从运动学的角度对旋转轴位置的影响进行解释。三种不同旋转轴位置下的翅膀平动及攻角变化完全相同，所以他们的升阻力曲线差异主要由翅膀旋转效应产生，即主要是翅膀不同位置处的旋转速度和旋转加速度差异所导致。下面结合图 3.11、图 3.12 和图 3.13，比较算例 A 和算例 C 的翅膀转动速度和转动加速度差异。

下拍平动加速阶段。刚开始转动速度大，转动加速度小，所以转动速度对升阻力起主要作用，算例 A 翅膀转动速度以向右上为主(图 3.12-AB)，受到气体对其左下方的力，算例 C 翅膀转动速度以向左下为主(图 3.12-AB)，受到气体对其向右上方的力，这使得算例 A 翅膀下翼面的压强小于算例 C，而上翼面的压强大于算例 C(图 3.13-A、B)，因此算例 A 升力和阻力均小于算例 C(图 3.11)。随着时间推移，转动速度逐渐减少，而转动加速度逐渐增加，因此转动加速度对升阻力特性逐渐起主要作用，算例 A 转动加速度以向左下方为主(图 3.12-AB)，受到

气体对其向右上方的力，算例 C 转动加速度以向右上方为主(图 3.12-AB)，受到气体对其向左下方的力，这使得算例 A 下翼面的压强逐渐大于算例 C，而上翼面的压强逐渐小于算例 C(图 3.13-C)，因此算例 A 升力逐渐大于算例 C，由于此时的翅膀接近于水平状态，所以两者的阻力差别不大，均接近于零(图 3.11)。

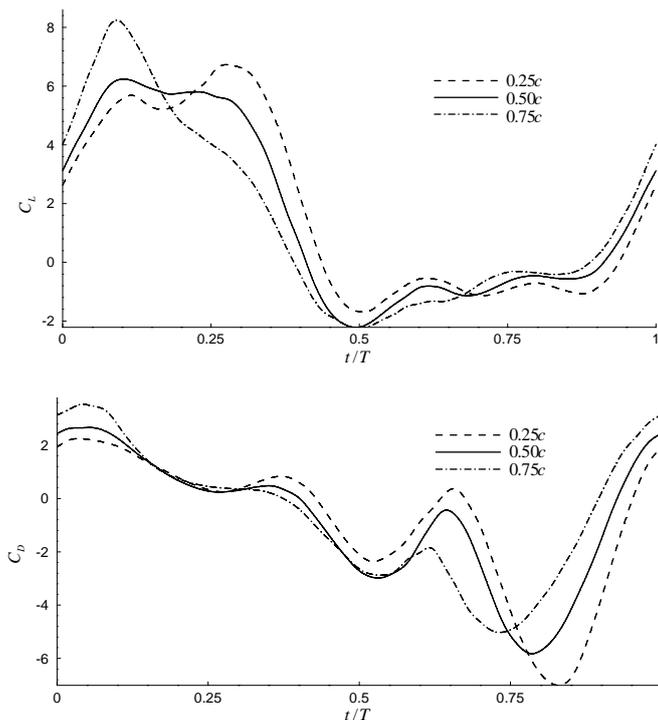


图 3.11 不同俯仰转动轴下的升阻力曲线图。三者转轴距离翼前缘分别为 0.25c,0.50c,0.75c.

Fig 3.11 Lift and drag curve in different roll axis. Distances from lead edge to roll axis are 0.25c, 0.50c, 0.75c respectively.

下拍平动减速阶段。算例 A 转动速度和转动加速度都以向左下方为主，算例 C 转动速度和转动加速度都以向右上方为主(图 3.12-BC)，这使得算例 A 下翼面的压强始终大于算例 C，而上翼面的压强始终小于算例 C(图 3.13-D、E)，所以此时间段算例 A 升力总大于算例 C，随着攻角的增大，算例 A 阻力也由原来的接近于算例 C 很快大于算例 C(图 3.11)。

上提平动加速阶段。刚开始转动速度大，而转动加速度小，转动速度起主导

作用, 算例 A 转动速度以向左下方为主, 算例 C 转动速度以向右上方为主(图 3.12-CD), 这使得算例 A 的下翼面压强大于算例 C, 而上翼面的压强小于算例 C(图 3.13-F), 因此算例 A 升阻力均大于算例 C. 随着时间推移, 转动加速度逐渐起主导作用, 算例 A 转动加速度以向右上为主, 算例 C 转动加速度以向左下为主(图 3.12-CD), 使得算例 A 的下翼面压强小于算例 C, 而上翼面的压强大于算例 C(图 3.13-G), 因此算例 A 的升力逐渐小于算例 C(图 3.11)。按推断, 此时间段算例 A 的推力(负阻力)应该逐渐大于算例 C, 但这一现象滞后到上提减速阶段才出现, 本文认为这主要是由于分析过程中只考虑翅膀运动带来的影响, 而没有考虑既有流场差异所造成的。由于此时间段翅膀接近垂直状态, 升力差别并不太大(图 3.11)。

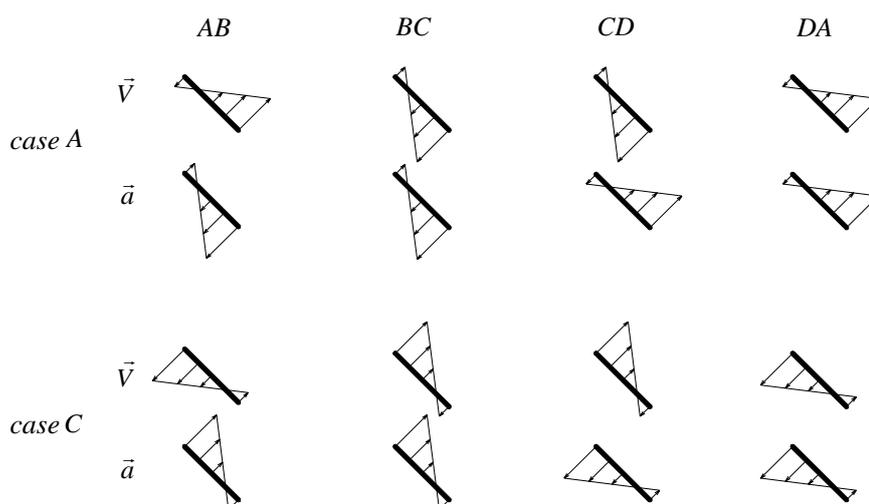


图 3.12 一个周期内四个不同阶段时两种转动轴位置下的转动速度和转动加速度示意图。AB 为下拍平动加速阶段, BC 为下拍平动减速阶段, CD 为上提平动加速阶段, DA 为上提平动减速阶段。case A 转轴距离翼前缘为 $0.25c$, case C 转轴距离翼前缘为 $0.75c$ 。

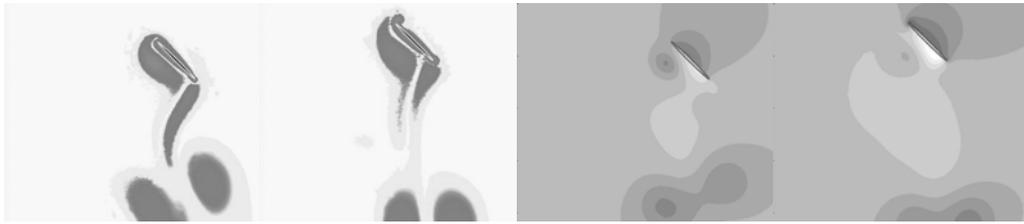
Fig 3.12

上提平动减速阶段。算例 A 转动速度和转动加速度都以向右上方为主, 算例 C 转动速度和转动加速度都以向左下方为主(图 3.12-DA), 这使得算例 A 下翼面的压强始终小于算例 C, 而上翼面的压强始终大于算例 C(图 3.13-H), 所以此时间

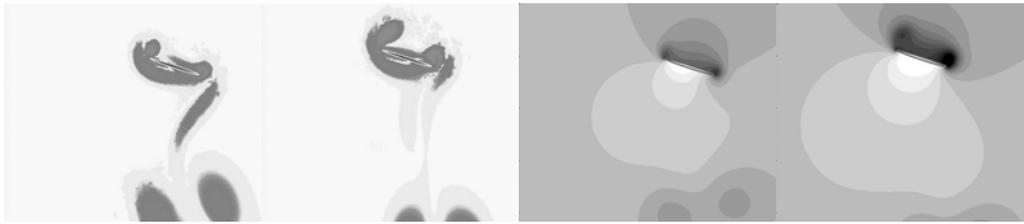
段算例 A 升阻力总大于算例 C(图 3.11). 此时间段翅膀接近垂直状态, 所以升力差别较小, 而阻力差别较大(图 3.11)。

总体看, 旋转轴前移升力和推力均增大。升力增大是由于翅膀下拍减速阶段的翼后缘向下加速旋转(顺时针); 推力增大是由于翅膀上提减速阶段的翼后缘向右加速旋转(逆时针)。

(A) $t=0.0T(t=1.0T)$



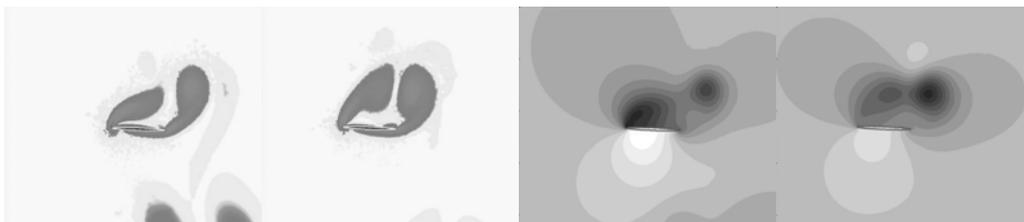
(B) $t=0.1T$



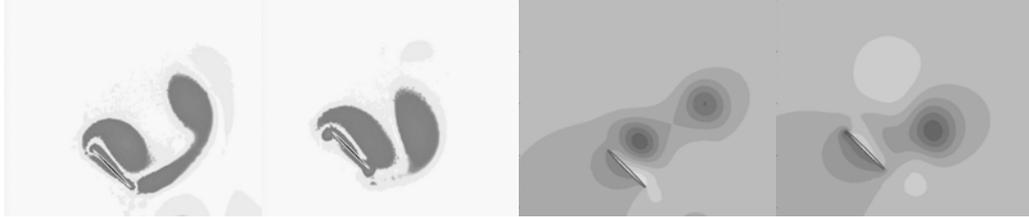
(C) $t=0.25T$



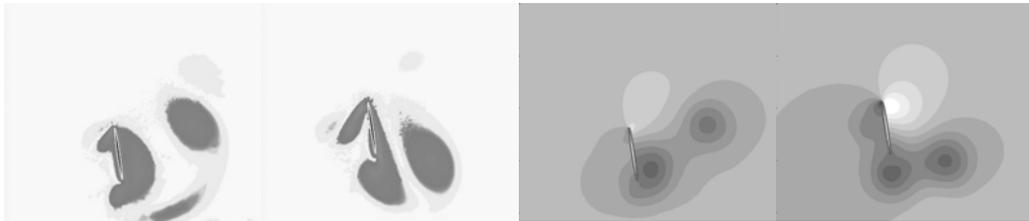
(D) $t=0.30T$



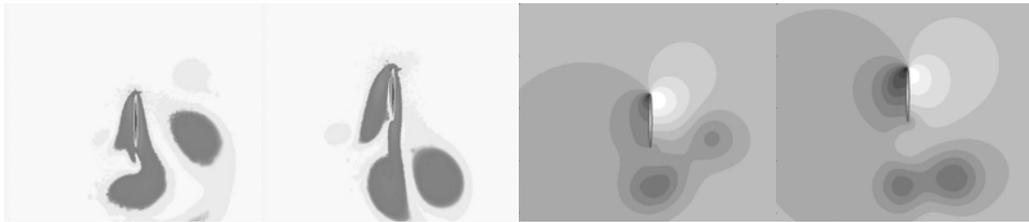
(E) $t=0.5T$



(F) $t=0.65T$



(G) $t=0.75T$



(H) $t=0.825T$

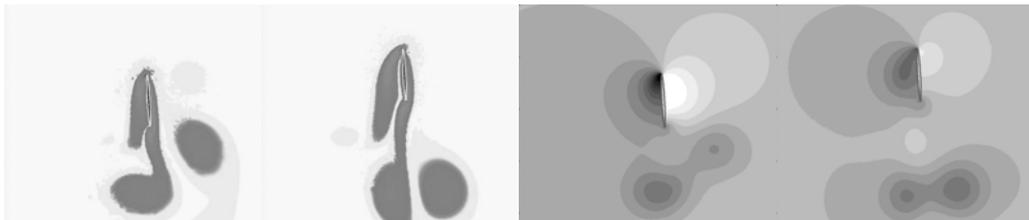


图 3.13 一个周期内不同转动轴下的涡量图、压强比较图。第一列为 case A 涡量图，第二列为 case C 涡量图，第三列为 case A 压强图，第四列为 case C 压强图。case A 转轴距离翼前缘为 $0.25c$, case C 转轴距离翼前缘为 $0.75c$ 。压强图中白色表示高压，黑色表示低压。

Fig3.13 Vortex and pressure curve of different roll axis. The fist row is vorticity of case A, the second is case B and the third one is pressure contour of case A, the fourth one is pressure contour of case C. The distance form

ledge to axis is 0.25C, 0.5C and 0.75C respectively.

3.6.2.3 翅膀转动模式(相位角)的影响

sun(2002)等提出转动模式(旋转相位角的改变)对升阻力特性的影响相当可观。为此,本文计算了三种不同相位角下的翅膀升阻力特性: $\phi = \pi/6$ (超前模式), $\phi = 0$ (对称模式), $\phi = -\pi/6$ (滞后模式), 其他参数相同, 均为直线拍动、转轴距翼前缘 $0.5c$ 。三种转动模式下的平均升阻力见表 3.3。超前模式的平均升推力均为最大, 其次是对称模式, 而滞后模式下的升推力均为最小。超前模式的升力几乎是稳态下最大升力的两倍, 而滞后模式下的平均升力却比稳态下的升力还小。可见转动模式对升阻力特性的影响比拍动轨迹、俯仰转轴位置更为显著。

表 3.3 不同转动模式下的平均升阻力系数。超前模式中 $\phi = \pi/6$, 对称模式中 $\phi = 0$, 滞后模式中 $\phi = -\pi/6$.

Table 3.3 Lift and drag coefficient of different roll model.

	C_L	C_D	C_R
advanced	1.92	-1.03	2.18
symmetrical	1.58	-0.83	1.79
delayed	0.21	-0.53	0.56

翅膀俯仰转轴位于翅弦中点, 翅膀前半弦长和后半弦长的转动速度和加速度大小完全对称而方向相反, 合作用效果对升阻力的影响可以近似忽略, 另外各种转动模式下的平动函数也完全相同, 因此本文认为图 3.14 中两种拍动模式下升阻力曲线差异主要是攻角不同带来的。

首先引入正迎角的概念: 拍动平面和翼弦的夹角称为正迎角, 此角越大则正迎面

积(翅膀在垂直于来流方向上的投影面积)越大,当正迎角为 90 度时,正迎面积达到最大,等于翅膀面积。本文中,正迎角可以如下计算(其中 $\beta = 60^\circ$):

$$\theta = \begin{cases} \alpha + \beta & \text{if } \alpha + \beta \leq 90^\circ \\ 180^\circ - (\alpha + \beta) & \text{if } \alpha + \beta > 90^\circ \end{cases} \quad (3.19)$$

下拍加速阶段,正迎面积越大越有利于升力的提高,因为较大的正迎面积可以推动较多质量的气体向下加速运动,这必然使翅膀得到较大的方向向上的反作用力,从而产生大升力。在 $t=0.1T$ 时刻,对称模式的正迎角大于超前模式($78.5^\circ > 63.9^\circ$)(图 3.15-B),因此对称模式的升力大于超前模式(图 3.14);在 $t=0.25T$ 时刻,超前模式的正迎角为 66.0° 大于对称模式($66.0^\circ > 60.0^\circ$)(图 3.15-C),因此超前模式的升力大于对称模式(图 3.14)。

下拍减速阶段,初始时段,速度起主导作用,正迎面积越大越有利于升力的提高。在 $t=0.30T$ 时刻,超前模式的正迎角大于对称模式($74.9^\circ > 62.2^\circ$)(图 3.15-D),因此超前模式的升力大于对称模式(图 3.14)。在 $t=0.375T$ 时刻,虽然依然是超前模式的正迎角大于对称模式($86.6^\circ > 73.2^\circ$)(图 3.15-E),但随着平动速度的降低、平动加速度的提高(加速度和速度方向相反),大升力的优势已经不太明显(图 3.14)。随着时间的进一步推移,平动加速度逐渐占主导地位,正迎面积越小越有利于升力的提高,因为翅膀加速度向上,必然受到空气对其向下的反作用力,此力越大,就会产生越大的负升力。而超前模式在此时间段的正迎角恰好小于对称模式($t=0.50T$ 时刻,超前模式为 52.5° ,对称模式为 75.0° 。见 3.15-F),这使得超前模式有较小的负升力(图 3.14)。

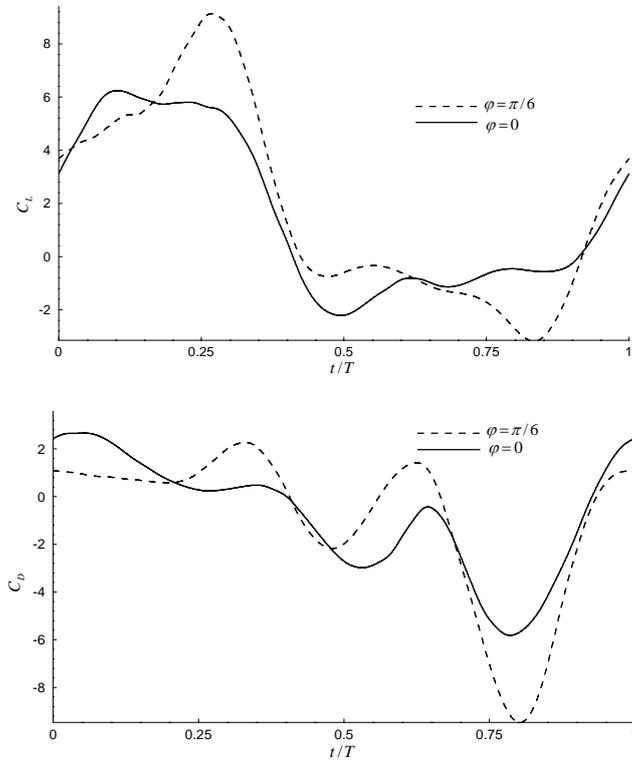


图 3.14 一个周期内不同转动模式下的升阻力曲线。 $\varphi = \pi/6$ 为超前转动模式， $\varphi = 0$ 为对称转动模式。

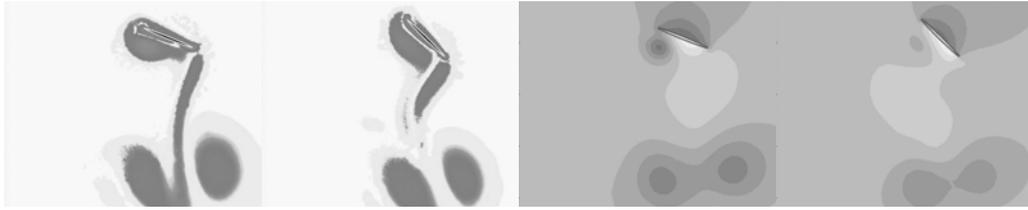
Fig 3.14 Lift and drag curve of different roll model in one period.

上提加速阶段，正迎面积越大越有利于推力的产生，因为较大的正迎面积可以推动较多质量的气体向右加速运动，这必然使翅膀得到较大的方向向左的反作用力，从而产生大推力。在 $t=0.625T$ 时刻，对称模式下的正迎角大于超前模式 ($43.2^\circ > 31.5^\circ$) (图 15-G)，因此对称模式的推力大于超前模式 (图 3.14)； $t=0.75T$ 时刻，超前模式的正迎角大于对称模式 ($36.0^\circ > 30.0^\circ$) (图 3.15-H)，因此超前模式的推力大于对称模式 (图 3.14)。

上提减速阶段，初始时间段，速度占主导作用，正迎面积越大越好。 $T=0.825T$ 时刻 (图 3.15-I)，超前模式正迎角大于对称模式 ($50.5^\circ > 34.9^\circ$)，因此推力较大 (图 3.14)。

上述分析均是从翅膀运动学的角度入手,对两种模式下的升阻力特性分析结果和图 3.14 中的升阻力曲线基本吻合,这证明了适时改变翅膀攻角(或者说正迎角)的重要性,同时也使我们认识到:提高升推力的一个重要原则便是推动尽可能多质量的气体向后下方快速运动。

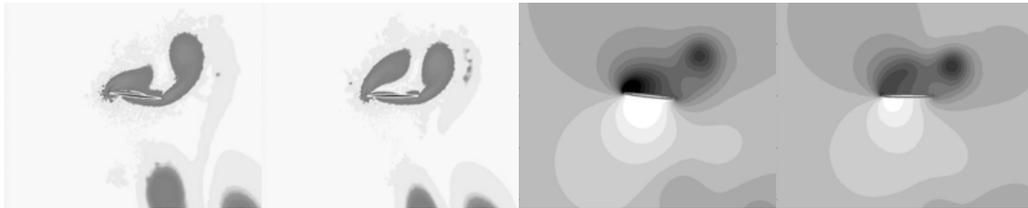
(A) $t=0.0T(t=1.0T)$ $\theta_1 = 82.5^\circ$ $\theta_2 = 75.0^\circ$



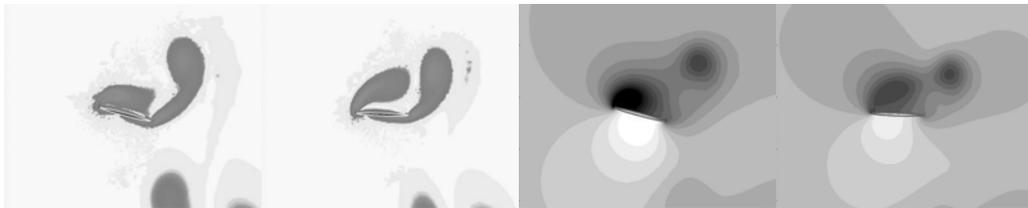
(B) $t=0.1T$ $\theta_1 = 63.9^\circ$ $\theta_2 = 78.5^\circ$



(C) $t=0.25T$ $\theta_1 = 66.0^\circ$ $\theta_2 = 60.0^\circ$



(D) $t=0.30T$ $\theta_1 = 74.9^\circ$ $\theta_2 = 62.2^\circ$



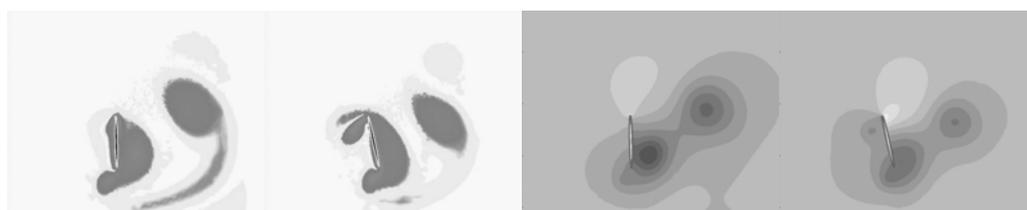
(E) $t=0.375T$ $\theta_1 = 86.6^\circ$ $\theta_2 = 73.2^\circ$



(F) $t=0.5T$ $\theta_1 = 52.5^\circ$ $\theta_2 = 75.0^\circ$



(G) $t=0.625T$ $\theta_1 = 31.5^\circ$ $\theta_2 = 43.2^\circ$



(H) $t=0.75T$ $\theta_1 = 36.0^\circ$ $\theta_2 = 30.0^\circ$



(I) $t=0.825T$ $\theta_1 = 50.5^\circ$ $\theta_2 = 34.9^\circ$



(J) $t=0.875T$ $\theta_1 = 63.4^\circ$ $\theta_2 = 43.8^\circ$



图 3.15 一个周期内不同拍动模式下的涡量、压强比较图。第一列为超前转动模式涡量图，第二列为对称转动模式涡量图，第三列为超前转动模式压强图，第四列为对称转动模式压强图。 θ_1 为超前转动模式正迎角， θ_2 为对称转动模式正迎角。压强图中白色表示高压，黑色表示低压。

Fig3.15 Vortex structure of different roll model in one period. The first row is vorticity contour of turning model. The second one is symmetry turning. The third one is advanced turning. The fourth one is pressure contour of symmetry turning.

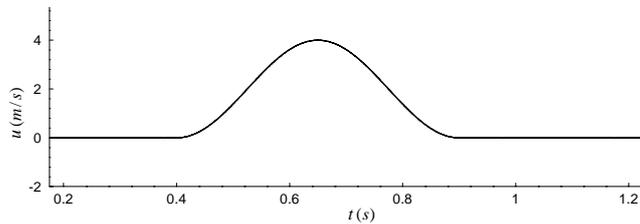
3.6.2.3 阵风干扰下的翅膀拍动升阻力特性:

实际观察到昆虫在逆风飞行时，几乎无法克服风吹阻力而前进，甚至出现随气流 flow back 倒退的现象，但它依然能够提供足够的升力而不坠落。为了研究其中的原因，本文计算了昆虫翅膀在风载干扰下的飞行特性：翅膀最初在静止空气中拍动，当 $t=0.4s$ 时，干扰阵风迎面吹来， $t=0.9s$ 后，干扰阵风结束，在 $0.4s < t < 0.9s$ 之间，风载函数为：

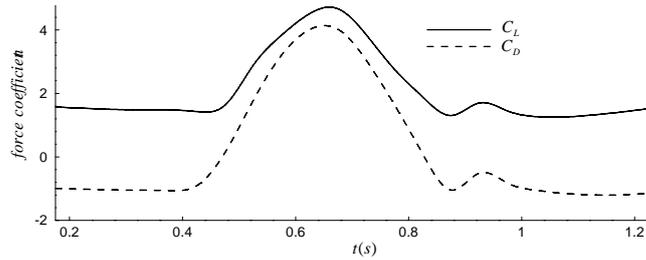
$$V(t) = 2 - 2\cos(4\pi(t - 0.4)) \quad (3.20)$$

对计算结果中每个拍动周期内的升阻力求平均值，再对平均值作样条拟合，得到平均升阻力曲线如图 3.16 所示。在阵风吹来之前，升阻力平稳，升力系数保持在 1.5 左右，阻力系数约为 -1.0，随着阵风的到来，速度由零逐渐变大，升阻力也随之增大，当风速达到最大 4m/s 时，升阻力也接近达到最大值，升力系数约为 4.5，阻力系数约为 3.8，随着风速的下降，升阻力也开始变小，在接近 0.87s 时，升阻力达到最小值，随后升阻力又稍微回升，在 0.9s 时，风速变为零，但此时升阻力并没有平稳，而是又经过一个小的波动后才逐渐趋于稳定。升

力由 1.5 增加到 4.5 然后再逐渐恢复到 1.5 的过程说明：迎面干扰风不但没有降低升力，还使得升力有所提高；阻力由-1.0 变为 3.8 然后又逐渐恢复到-1.0 的过程说明：正在前飞中的昆虫可能会由于迎面干扰风的作用而产生倒退现象。此计算结果正好给出了昆虫逆风飞行无法前进而不会坠落的原因。升阻力随阵风吹过而产生的上述波动现象是设计微型飞行器必须考虑的一个问题，它直接关系到微型飞行器的飞行稳定性。



(a)



(b)

图 3.16 风载速度函数曲线及风载干扰下的升阻力特性变化曲线。

Fig3.16 Lift and drag influence with wind load.

3.7 结论

本章首先证明了在 $Re = 157$ 的扑翼飞行中，升阻力依然主要由翅膀上下翼面压力差产生，粘性剪切力对升阻力只起次要作用。在此基础上，能够从非定常翅膀运动学角度定性解释各种飞行参数下升阻力形成的原因。

通过对拍动轨迹、俯仰转动轴位置、转动模式等翅膀运动学参数的研究，发现非

定常升力得到提高的时间段集中处在下拍中点位置附近,此时间段的翅膀运动特征是:下拍速度最快,翅膀接近于水平姿态(攻角接近 0);非定常推力得到提高的时间段集中处在上提中点位置附近,此时间段的翅膀运动特征是:上提速度最快,翅膀接近于竖直姿态(攻角接近于 90)。因此,本文认为翅膀快速和加速下拍是产生大升力的主要原因,翅膀快速和加速上提是产生大推力的主要原因。这种加速和高速拍动使上翼面前后缘涡不断积聚变大,但不脱落,促成较大低压区的长时间保持,高的压力差产生了大的升推力。如果从运动学的角度解释,翅膀产生较大升力和较大推力的主要原因是翅膀适时的改变攻角使得较多质量的气体向下方和后方流动,因而使翅膀受到较大的反作用力,这种反作用力即为升推力。

另外值得提到的一点是:蜻蜓飞行能耗主要用于克服升阻力,改变翅膀攻角的运动几乎不耗费能量,但改变攻角却能够非常有效地改变升阻力大小。因此通过灵活改变攻角来实现微型飞行器的机动飞行将是不错的选择。

参考文献:

- [1] Dmitry L. Grodnitsky and Pahvel P. Morozov(1993). Vortex formation during tethered flight of functionally and morphologically two-winged insects, including evolutionary considerations on insect flight. *J. Exp. Biol.* 182, 11-40.
- [2] Michael H. Dickinson and Karl G. Götz(1996). The wake dynamics and flight forces of the fruit fly *Drosophila melanogaster*. *J. Exp. Biol.* 199, 2085-2104.
- [3] Michael H. Dickinson and Karl G. Götz(1993). Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers. *J. Exp. Biol.* 174, 45-64.
- [4] Charles P. Ellington, Coen van den Berg, Alexander P. Willmott and Adrian L. R. Thomas(1996). Leading-edge vortices in insect flight. *Nature.* 384, 626-630.
- [5] Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann and Sanhay P. Sane(1999). Wing Rotation and the Aerodynamic basis of insect flight. *Science* 284, 1954-1960.

- [6] Sanjay P. Sane and Michael H. Dickinson(2001). The control of flight force by a flapping wing: lift and drag production. *J. Exp. Biol.* 204, 2607-2626.
- [7] James M. Birch and Michael H. Dickinson(2001). Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature* 412, 729-733.
- [8] Hao Liu, Charles P. Ellington, Keiji Kawachi, Coen Van Den Berg and Alexander P. Willmott(1998). A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering. *J. Exp. Biol.* 201, 461-477.
- [9] Z. Jane Wang(2000). Two dimensional mechanism for insect hovering. *Physical Review Letters.* 85, 2216-2219.
- [10]Z. Jane Wang, James M. Birch and Michael H. Dickinson(2004). Unsteady forces and flows in low Reynolds number hovering flight: two-dimensional computations vs robotic wing experiments. *J. Exp. Biol.* 207, 449-460.
- [11]Shi Long Lan and Mao Sun(2001). Aerodynamic force and flow structure of two airfoils in flapping motions. *Acta Mechanica Sinica.* 17, 310-331.
- [12]Mao Sun and Jian Tang(2002). Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion. *J. Exp. Biol.* 205, 55-70.
- [13]Steven Ho, Hany Nassef, Nick Pornsinsirak, Yu-Chong Tai and Chih-Ming Ho(2003). Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers. *Progress in Aerospace Science.* 39, 635-681.
- [14]Ravi Ramamurti and William Sandberg(2001). Computational study of 3-D flapping foil flows. *AIAA-2001-0605.*
- [15]Fumiya Togashi, Yasushi Ito, Mitsuhiro Murayama, Kazuhiro Nakahashi and Takuma Kato(2001). Flow simulation of flapping wings of an insect using overset unstructured grid. *AIAA-2001-2619.*
- [16]J. M. Wakeling and C. P. Ellington(1997). Dragonfly flight I : Gliding flight and steady-state

- aerodynamic forces. J. Exp. Biol. 200, 543-556.
- [17] J. M. Wakeling and C. P. Ellington(1997). Dragonfly flight II : Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight. J. Exp. Biol. 200, 557-582.
- [18] J. M. Wakeling and C. P. Ellington(1997). Dragonfly flightIII: Lift and power requirements. J. Exp. Biol. 200, 583-600.
- [19]Masato Okamoto, Kunio Yasuda and Akira Azuma(1996). Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly. J. Exp. Biol. 199, 281-294.
- [20]T. Weis-Fogh(1973). An exception is a special class of tiny insects. J. Exp. Biol. 59,169.
- [21]Steven N. Fry, Rosalyn Sayaman, Michael H. Dickinson(2003). The aerodynamics of free-flight Maneuvers in *Drosophila*. Science. 300, 495-498.

第四章 PIV 实验模拟

4.1 引言

在对昆虫的飞行研究过程中，引起了物理学家和工程师很大的兴趣，在传统的空气动力学理论看来他们的飞行几乎不可能，深入了解空昆虫的飞行要依靠那些可能在理论或试验上易被忽略的细节。借助于高速摄影研究人员已可以捕获(抓取)翅膀运动状态，像 DPIV 这样的新方法可以使得获得流场，使得研究人员手段得以加强。通过这些方法他们就可以构建更加严格的昆虫飞行模型，也就可以更详细地在运动学，升力和流畅，这些在理解昆虫飞行空气动力学过程有重大意义。

早期对昆虫模型分析研究限制在远场尾迹而非翅膀近区域的流动现象，尽管这样的远场模型不能计算机翼的瞬时升力，但是提供了平均升力和能量需求，其中较为注目的是‘漩涡模型’ [1][1][2][3][4][5]都是由近似机翼的推进器驱动，更确切地说，是由理想化的执行器产生的标准压力脉冲对周围分出下向动量,通过同样的方法，悬停所需要的平均升力可以用流体动量变化率平衡体重来估计,并因此计算尾迹中包含这以力平衡的环量，详细的描述可以查看 Ellington[1][2][3][4][5],这也超出了本文的范围。通过模型一些研究者已经能建立分析进场的昆虫飞行空气动力学模型，并取得了一些成果，其中较为注目的是：Lighthill[7]为了验证 Weis-Fogh 升力机制(也叫 clap-fling)，Savage 等[8]在基于一个理想的对蜻蜓运动测量模式。尽管管这个模型都是二维的无粘，但已经可以捕获一些潜在机理的决定性因素，由 Maxworthy[6][10]的实验数据所证实，类似地 Savage 等[8]的模型所作出的在特殊飞行姿态机理也为后来的试验证实，San 和 Dickinson [12]在对于蜻蜓的研究中也获得一定的成功(Azuma 等[13]，sato 和 Azuma[14])，这一方法考虑了沿着展向空间和瞬时的诱导速度，以及基于尾迹的环量估计校正，近来得分析模型如：Zbikowski, Minotti[15]以一种更为严格的模式已经包含潜在扑翼飞行流体动力的基本现象。也有较为充分的升力以及运动数据库提供支持。

在美国国家科学基金资助下，G.R.spedding 和 T.Maxworthy[9]两位教授再次

对二维的 Weis-Fog 机构进行了试验试验在 $0.7\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 的有机玻璃水箱中进行，整个 Weis-Fogh 机构都放置在水中，它的两个翼片都用有机玻璃制成，其两端与驱动器相连，由步进式电机带动驱动，用人工方法合拢翼片，叶片长 30cm ，弦长 10cm ，有尖锐的导边，导边向上。为了显示流畅结构，在水中加入了直径为 0.75mm 的聚苯乙烯粒子，相对密度约为 1.035 ，将盐加入水中，使得盐水的相对浓度也达到 1.035 左右，以使得聚苯乙烯粒子可以悬浮在盐水中，利用 2kW 的灯光照射翼中间截面流畅，由 35mm 的录像机拍摄流畅，以粒子的速度表示当地的流体速度，以机翼表面粒子的速度表示流体经过机翼的速度，设在机翼流体表面速度为 u ，由下式：求得环量。

$$\Gamma = vx - uy \quad (4.1)$$

近来，用 DPIV 来描绘果蝇飞行的流畅结构，Birch and Dickinson[16]报道了导边涡的稳定附着，在涡核心范围内的轴向流动似乎比 $Re=1000$ 范围内的模型低一个数量级，他们观察了轴向势流在后翅导边涡上显著卷入了尖涡，由鹰蛾与果蝇的模型所的结果认为 3D 流畅界结构可能在高，低 Re 数有很大的不同。通过以上的描述可以看出，为了全面了解昆虫的飞行机理，对昆虫的机械模型研究是一个必要的过程，本章将介绍采用 DPIV 观察由步进电机控制的机械模型流畅结构。

4.2 实验原理及系统

4.2.1 PIV 测量原理

70 年代末由固体力学散斑法发展起来的粒子图像测速(Particle Image Velocimetry)技术，可瞬时无接触测量流场中一个截面上的二维速度分布，具有较高的测量精度。PIV 技术基本原理如图 4.1，图 4.1 所示。在流场中布撒示踪粒子，并用脉冲激光片光源入射到所测流场区域中，通过连续两次或多次曝光，粒子的图像被记录在底片上或 CCD 相机上：逐点处理 PIV 底片或 CCD 相机记录的图像。获得流场速度分布。

如果流场中的粒子浓度(单位容积中包容的粒子数)很高，实际记录在底片上的不是粒子图像，而是粒子群的散斑图像及其散斑图像的位移，在早期曾被采用，

并称为激光散斑测速技术(LSV)。国际上也通属于粒子图像测速范畴。

如果流场中的粒子浓度很稀,在确定粒子位移时常常采用单个粒子的识别和跟踪的方法,一个一个确定该粒子的速度。不同于当前公认的 PIV 方法,称为粒子跟踪测速技术(Particle Tracing Velocimetry),但也统称为 PIV。

如果流场中的粒子浓度中等,一段讲大约 4—10 对粒子 / 最小分辨容积内,实际我们不是采用确定单个粒子速度方法,而是采用了确定在该最小分辨容积内所有粒子的统计平均速度的方法,即是当今所谓的粒子图像测速技术。

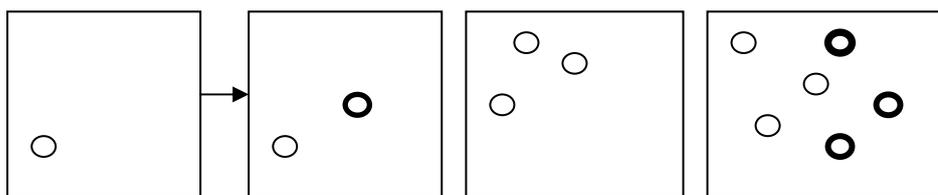


图 4.1 粒子两次曝光的图像记录示意图. 细线为第一次曝光, 粗线为第二次曝光

Fig4.1 Image of particle.

在已知的时间间隔 Δt 内, 跟随流体流动的示踪粒子群 i 被脉冲激光照射, 粒子的瞬间轨迹以粒子图像的形式曝光记录在底片或 CCD 芯片上, 如图所示, 第一次曝光(t_1)和第二次曝光(t_2)时刻的某一粒子的空间位置分别为 \vec{X}_{i1} 和 \vec{X}_{i2} , 对应图像记录平

面的位置分别为 \vec{X}_{i1} 和 \vec{X}_{i2} , 其速度为:

$$\vec{u} = \frac{\Delta \vec{X}_i}{\Delta t} = \frac{\vec{X}_{i2} - \vec{X}_{i1}}{t_2 - t_1} = \frac{\vec{x}_{i2} - \vec{x}_{i1}}{M(t_2 - t_1)} \quad (4.2)$$

M 为放大率, 即观测流场区域和成像平面之比, 一般情况下 $M < 1$ 。

4.2.2 PIV 系统构成

作为最基本的二维 PW 系统, 其技术系统由下列基本构成: 照明流场的瞬时多次曝光光源(包括片光形成技术); 粒子图像的记录装置; 粒子图像的处理判读方法和设备; 作为示踪粒子的粒子发生和散布技术等。现分述如下:

4.2.2.1 照明流场的瞬时多次曝光光源系统

光源：多次曝光照明系统采用的激光器。所需激光器的功率或单位脉冲能量的大小取决于观测流场的大小，粒子的大小，流动速度，感光的底片或 CCD 器件的灵敏度等。

4.2.2.2 粒子图像记录装置

将多次曝光的粒子位移场的信息瞬时记录下来。通常采用照相机照相记录在底片(可称底片 PIV 或 FPIV)，或采用 CCD 相机，直接由 CCD 光电转换芯片将粒子图像转换成数字信息输入计算机，现称数字式 PIV 或 DPIV。

早期 PIV 记录大多采用照相底片作记录，因可充分利用已有设备，各类相机都可以采用，各种大小不同、感光度不同和分辨力不同的底片都曾采用过。原则上讲底片的尺寸越大，取得实际的流场的空间分辨力越高，取得的每幅向量速度场的速度向量数越多；目前 CCD 相机发展较快，空间分辨力由 512x 512 像素到侧 4096x4096 侧像素均有应用，目前以 1024×1024，帧速 30 帧 / 秒的为多，价格也有所下降。相应需配置数据转换和传输率大于 20—40MB / s 的图像卡和相应的测算速率，以能及时记录粒子的图像。

以上照相底片和普通 CCD 相机都只能将多次曝光(2—3 次)的粒子图像记录存同一幅底片或同一帧 CCD 图上，因而在处理粒子图像数据时只能用自相关法，不能自动判别速度方向。目前已有专用的称为跨帧 CCD 相机，可以将两次曝光的粒子图像分别记录在两帧图像上，可以用互相关法处理数据。

跨帧相机与普通相机不同是采用了特殊的 CCD 芯片，该芯片除行一般芯片的光电转换阵列利采样传送功能外，此芯片附有作快速缓存的存储器，对应每一个象元都有一个存储单元。当第帧光脉冲曝光后，第一帧光电信号即存储到存储器上。尽管还来不及作 A / D 转换和数据传输到计算机上，CCD 器件的芯片即可接受第一个光脉冲的曝光(第二帧图像)。由此不但实现了二次光脉冲曝光分别记录在相继的二帧图像上、并且保证了二次光脉冲的时间延时(Δt)可以调整，与脉冲激光器组系统同步工作。目前水平的跨帧相机(具有双曝光功能)的允许的最小时延时 Δt 约为 200ns—20 μ s，时延 Δt 越小，可测的最高速度越大。

4.2.2.3 PIV 粒子图像的判读

PIV 成象系统提供了在已加时间间隔 Δt 内流场中粒子群的位移信息记录. 提取粒子位移信息尽管在原理上很简单, 但由于信息十分巨大, 如果用人工来提取和判读的话, 将成为十分繁重的困扰的工作. 实现了自动判读系统成为必须. 根据粒子图象的记录, 将图像分割成许多小区, 每一小区称判读小区(训” 阴 $M_{jnx} \cdot Pot$), 对应流场的果一容积(代表流场中空间的有一定大小的点), 求取该为判读小区内粒子群的平均位移的大小和方向, 依次判读每一个小 K 的粒子图像, 从而取得全流场的位移向量场, 可称为粒子图像判读, 粒子图像数浓度从出下式明定

$$N_1 = N \Delta Z_0 \pi d_l^2 / 4M^2 \quad (4.3)$$

式中 N 为单位容积内的粒子数浓度, ΔZ_0 为激光片的厚度, d_l 判读小区(即判读光束直径) M 为放大率。

粒子图像判读的方法主要有光学杨氏条纹法(早期使用), 自相关, 互相关等, 由于算法复杂, 这里不介绍。

4.2.2.4 粒子撒均匀度和浓度要求

PIV 粒子布撒要求不同于流动显示的布撒要求, 对 PIV 全场测速讲, 只有粒子存在才能测速. 没有粒子的区域, 该区域也就没法测得速度, 因而要求全场均匀布撒粒子, 才能保证全场取得速度测量, 在实际布散中并非是件易事, 而且往往在需要观测的地区缺少粒子或没有粒子. 如旋涡的中心区, 边界层贴近壁面的区域, 出存在离心力、速度梯度、压力梯度等粒子难以存在于那些区域, 粒子越大, 越难做到, 存在所谓黑洞现象。

粒子的浓度也有一定要求, 粒子浓度太高不好, 对流动本身有一定影响. 有两相流问题. 粒子浓度太低也不行, 因为对每一点(实际是每一判速小区)的测速, 取决于取得的粒子像及其位移, 在判读小区内要有足够粒子对数(位移), 才能通过判读计算求得有足够信噪比的该小区的统计位移量. 原则上讲粒子对越多(粒子越小—相对判读小区讲), 信噪比越高. 在一定片光厚度、放大率下, 其粒子浓度可表示为

$$N = \frac{4nM^2}{\Delta Z \pi d_{\text{int}}^2} \quad (4.4)$$

式中 N 为判读小区的粒子对数, 一般应为 $n=3-12$, M 为放大率, ΔZ 为片光厚度;
 d_{int} 为判读小区直径。

一般讲, 对于不向流动介质, 实际采用不向的粒子及布撒技

4.2.2.5 若干实验基本参数选择问题

必须认真仔细地选择技术系统的若干参数。如粒子布撒密度、粒径、激光脉冲之间的时间、片光源的宽度和厚度、判读小区的大小、以及图像偏置的大小等等。这些参数中大多数是互相关联的, 就是说改变其中一个将影响其中的另一个。这些参数应该进行协调选择。表列出的经验为基础的选择。

表 4-1 PIV 参数的协调

Table 1 Parameters should be considered

参数	调节得较大时的有点	调节较小时的优点
照相机 F/#	大的聚焦深度	具有较多的进光量
底片速度	高的速度要求高的照明光强	较小的粒度, 更好的分辨率
判读区尺寸	每个判读区有更多的粒子图像大的最大位移	好的空间分别率好的空间分别率
粒子尺寸	散射更多的光线	跟随流动比较好
激光脉冲持续时间	每个脉冲有更多的能量	小的粒子条纹
激光功率	照片较大区域是可能的	价格低
球形焦点长度	小的光腰, 要求较小的空间	在照片区中的发散

根据理论分析和大量的实验经验, 选择上述参数应该遵循以下准则:

判读小区应该足够地小, 使得单个矢量能够充分地描述该区域的流动状态。这个

要求实际上对单个判读小区上的速度变化率提出了限制条件。

为了获得较高的有效数据率，每个判读小区内的粒子对应该多于 4—12 对。这个要求实际上是对实验时的粒子布撒浓度提出限制条件。事实上，小区内粒子对的数目取决于粒子布撒浓度、判读小区的大小、激光片光厚度和激光脉冲之间的时间间隔最大的粒子位移应该是判读小区的 25% 左右。这个要求的主要目的是提高判读小区中粒子对的百分比。当粒子图像位移增加时，判读小区内只有一个粒子图像的概率就会增加，小区中粒子对的百分比会减少。粒子位移对判读小区尺寸之比，可以由改变判读小区尺寸，使用图像偏置，或改变激光脉冲之间的时间所控制。

粒子最大垂直于片光方向的运动位移应该限于片光厚度的 25%。这个参数是由于考虑当粒子穿越片光时，并不是所有粒子都在两曝光时间期间始终在片光厚度内，而第二瞬间粒子已穿过片光厚度区，亦即有一部分粒子在两次曝光时间内只有一个粒子图像记录在底片上。因而有一个影响有效粒子对的百分数的参数：为了控制这个参数，可以调节片光源的厚度或激光脉冲之间的时间间隔。面内最小的粒子图像位移应该大于 2 倍的粒子图像直径 c 当粒子移动小于直径时，图像是一个单个椭圆形粒子图像，而不是两个球形粒子图像而难以判读 c 粒子图像位移可以由采用增加激光脉冲间隔时间、或采用图像偏置来增加。底片上必须有足够曝光量记录粒子图像。

4.2.3 实验系统

4.2.3.1 硬件部分

试验系统的硬件部分有，驱动部分(由广州市麦氏科技发展有限公司生产的 MSP01d 单轴控制器，110HB450B02 步进电机，1000W 电源，Q2BYG1106 驱动器)、激光照明光源(美国 IDT IRioade Laser 10W,795nm,model#IRCL)、高速 CCD(美国 IDT X-stream XS-4)、镜头(日本 NIKON AFMICRO 60mm 1:2.8D)、同步器(美国 IDT)、粒子(北京立方天地有限公司粒径为 $1-5\mu\text{m}$ ，密度 1.05)、有机玻璃叶片(共 6 块，见图 $\times\times$ 厚度 2mm)，钢化玻璃箱体(厚度 12mm，长 1200,高 800mm,宽 750mm)。系统图如下：



图 4.2 实验装置 A 系统图, B 叶片图

Fig4.2 (A) Experimental system (B) model wing

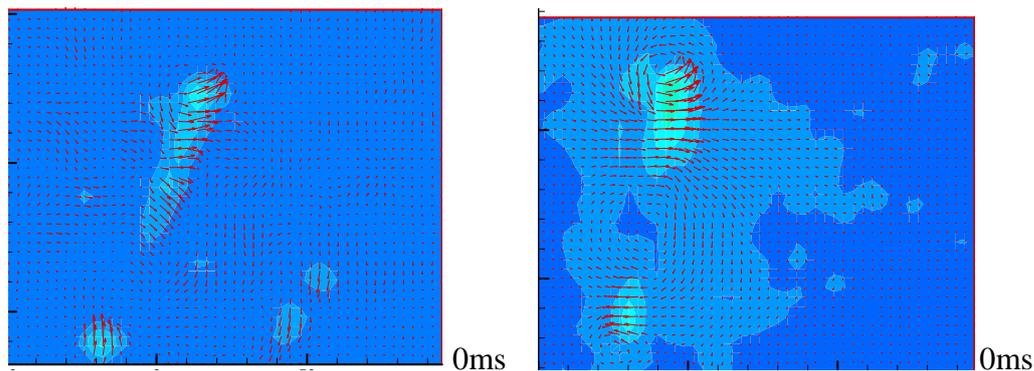
4.2.3.3 系统标定

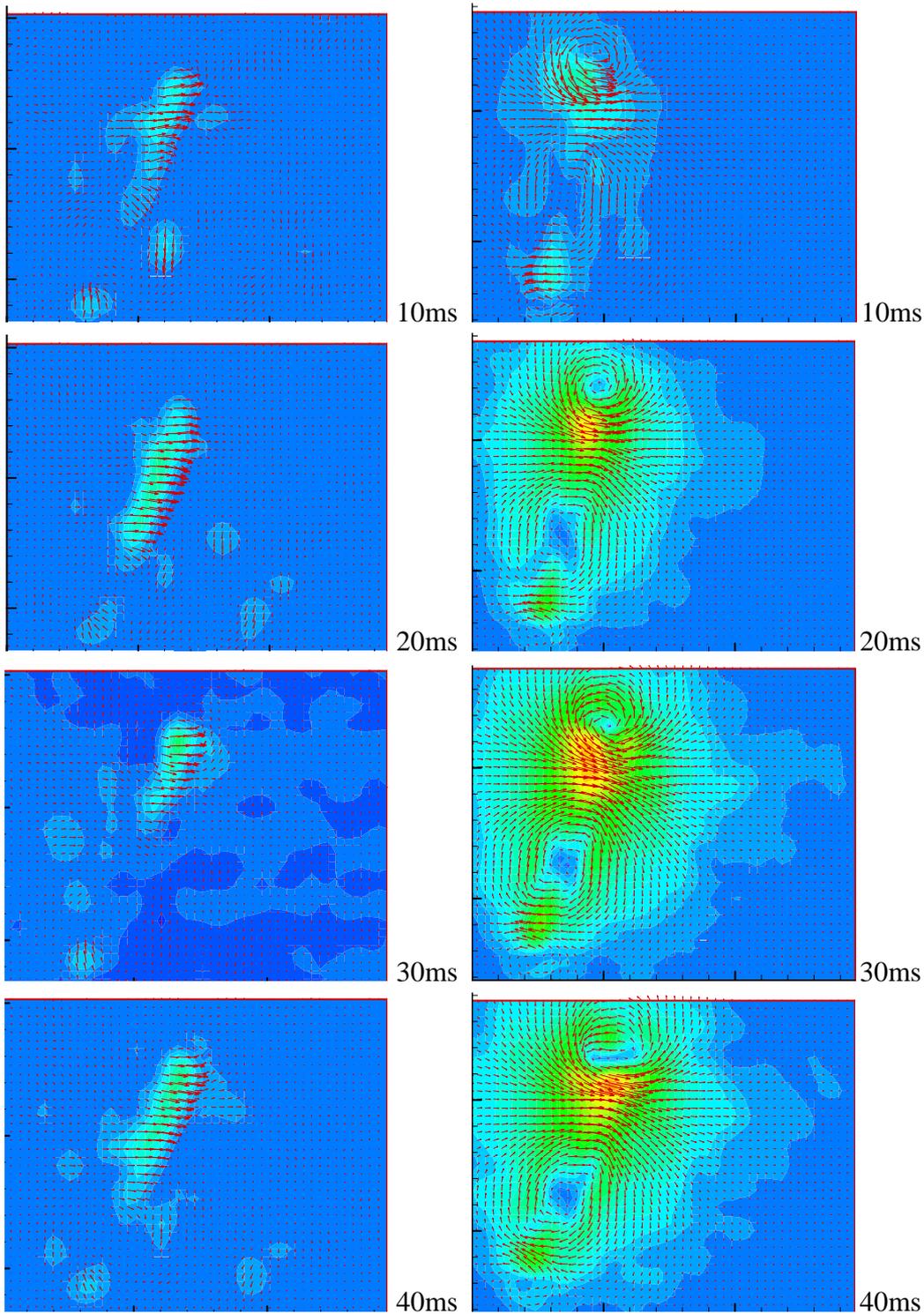
为了定量确定粒子流动速度,在测量前进行了系统标定,标定采用一已知尺寸的直尺。

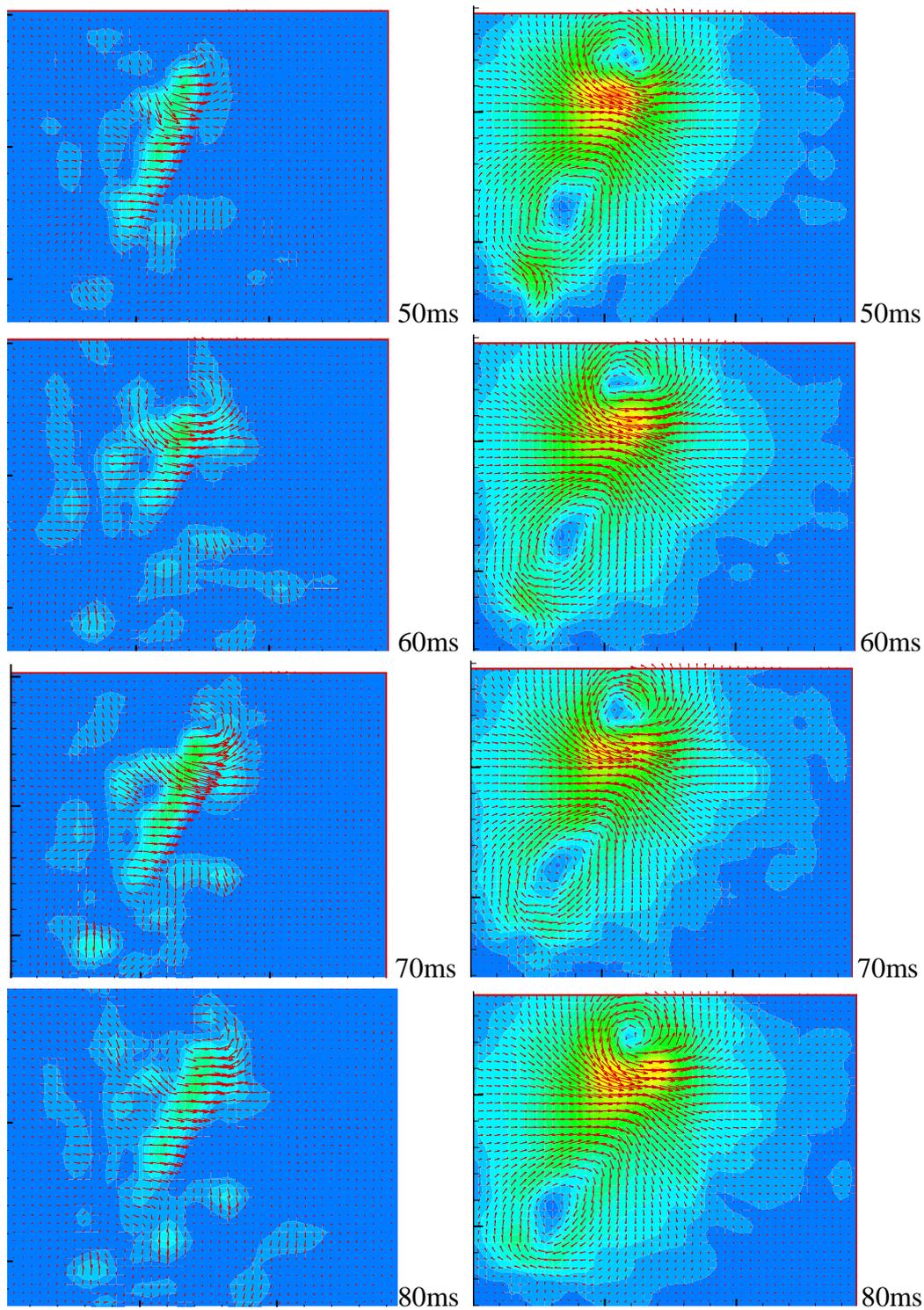
4.3 实验结果

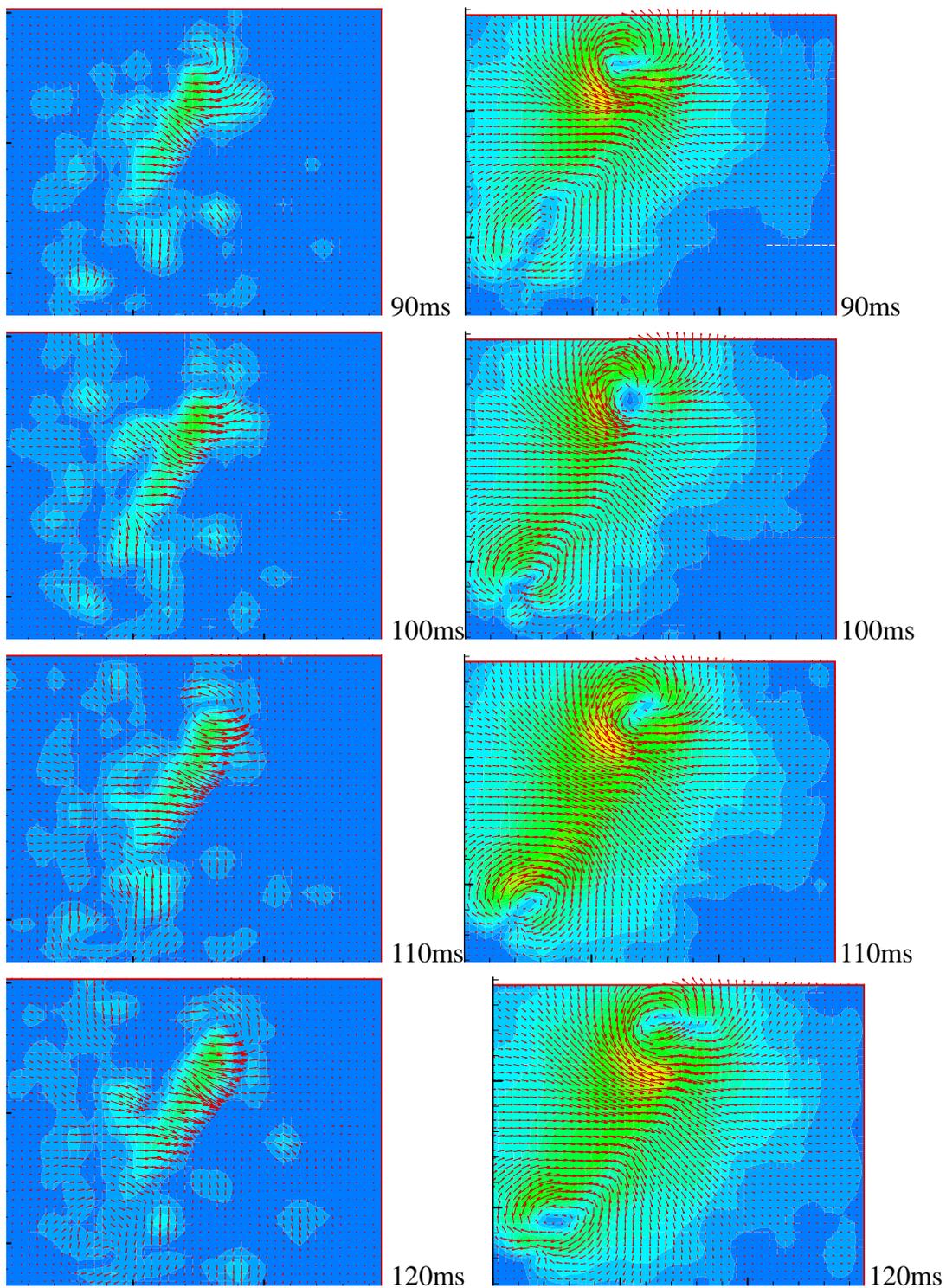
4.3.1 转轴的影响

在本文的第三章已经讨论了转轴对流场结构的影响,为了进一步验证,我们制作了两个尺寸相同的有机玻璃叶片,其转轴位置分别为距离前缘为 0.25,0.5,首先我们对启动过程对于流场的影响进行了分析,下面是 PIV 处理的启动流场结构。









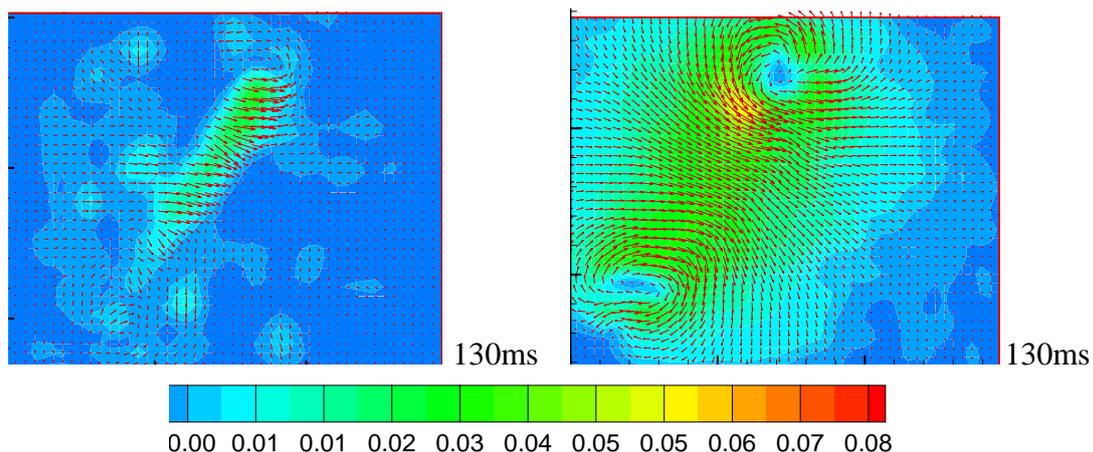
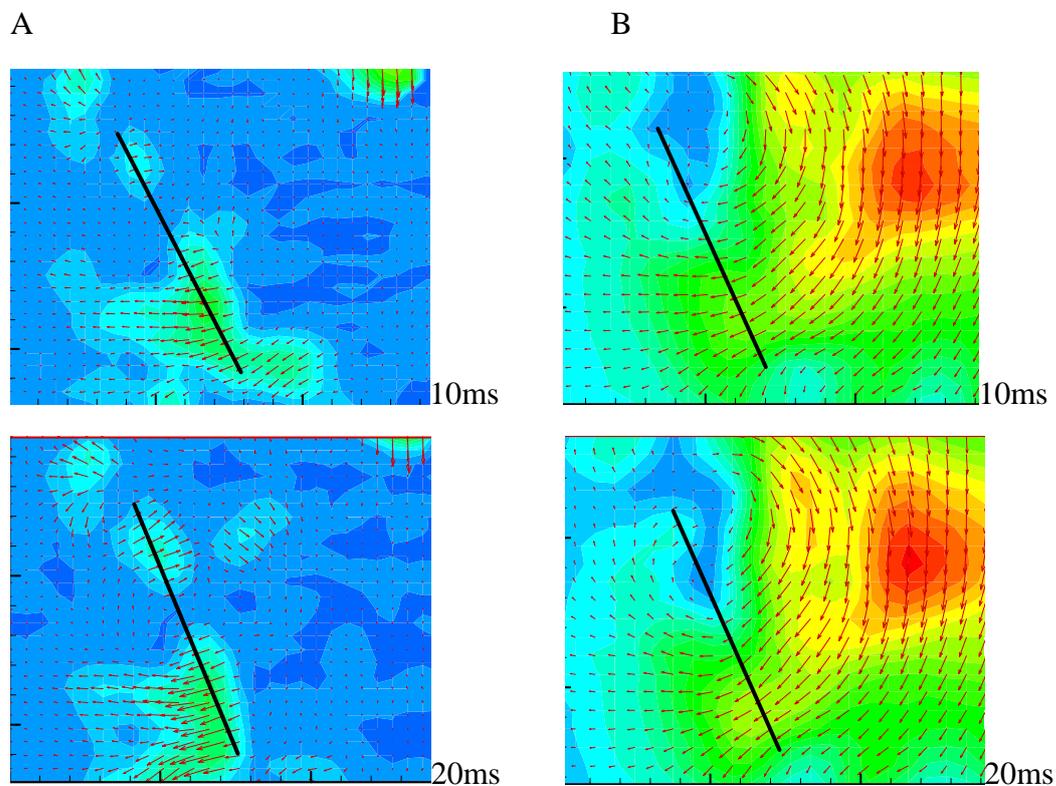


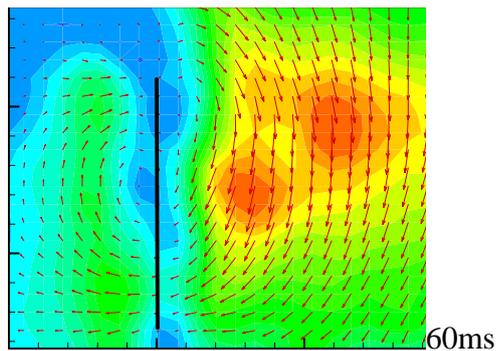
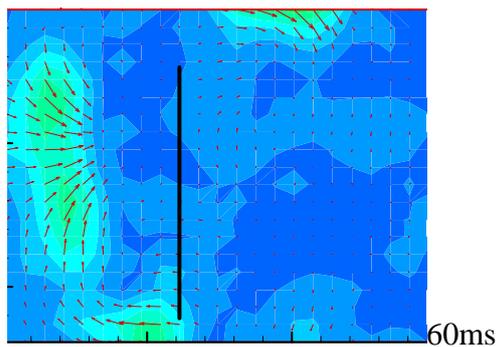
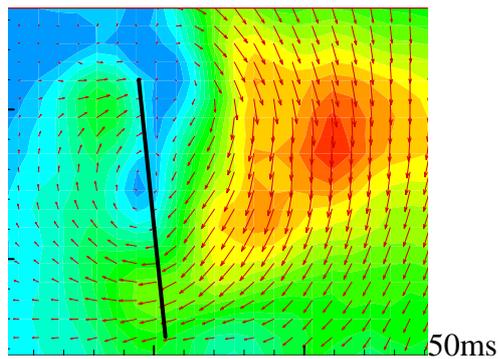
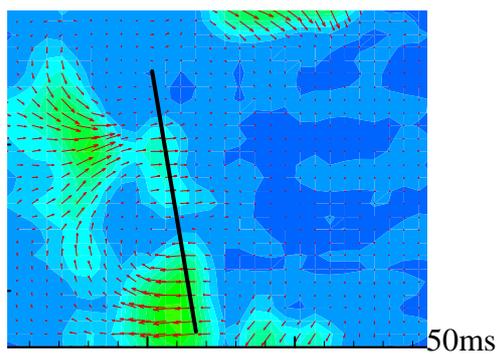
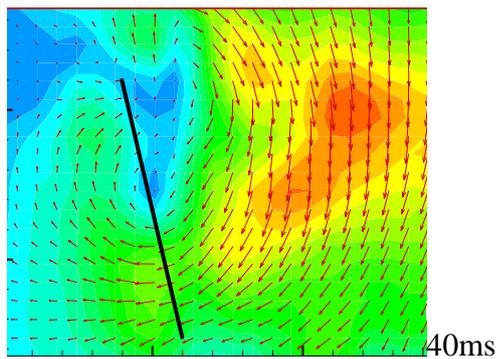
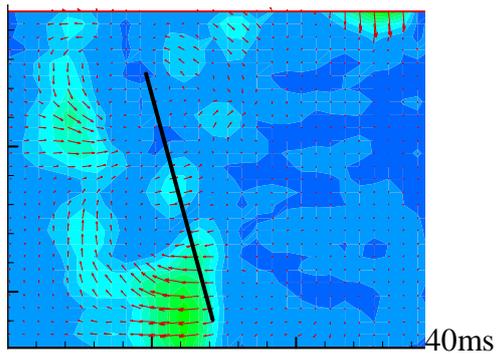
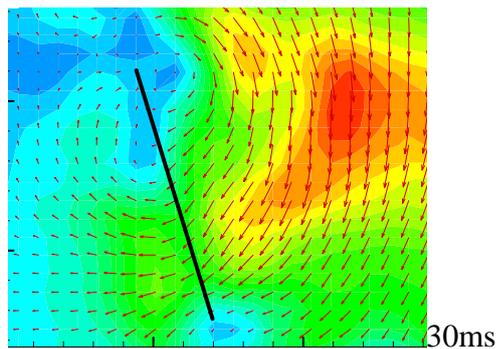
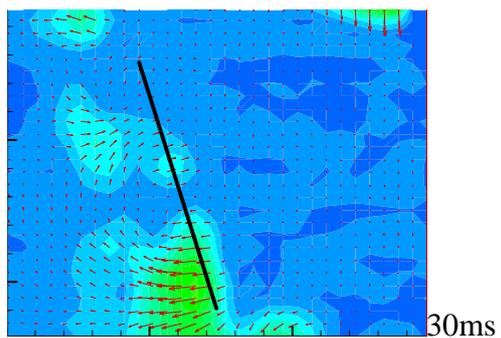
图 4.4 不同转轴位置启动过程流场结构

Fig4.4 Flow structure of start up

4.3.2 有滞留时间时的转轴影响影响

由于翅膀的拍动在转向期间会流体有极大的扰动，而且转向使用的时间长度不同也会导致流场有较大的差异，本文只给出转向滞留时间为 100ms 的两个叶片的流场结构，验证在转向时候两个叶片的流场是否也会和启动时一致的规律。





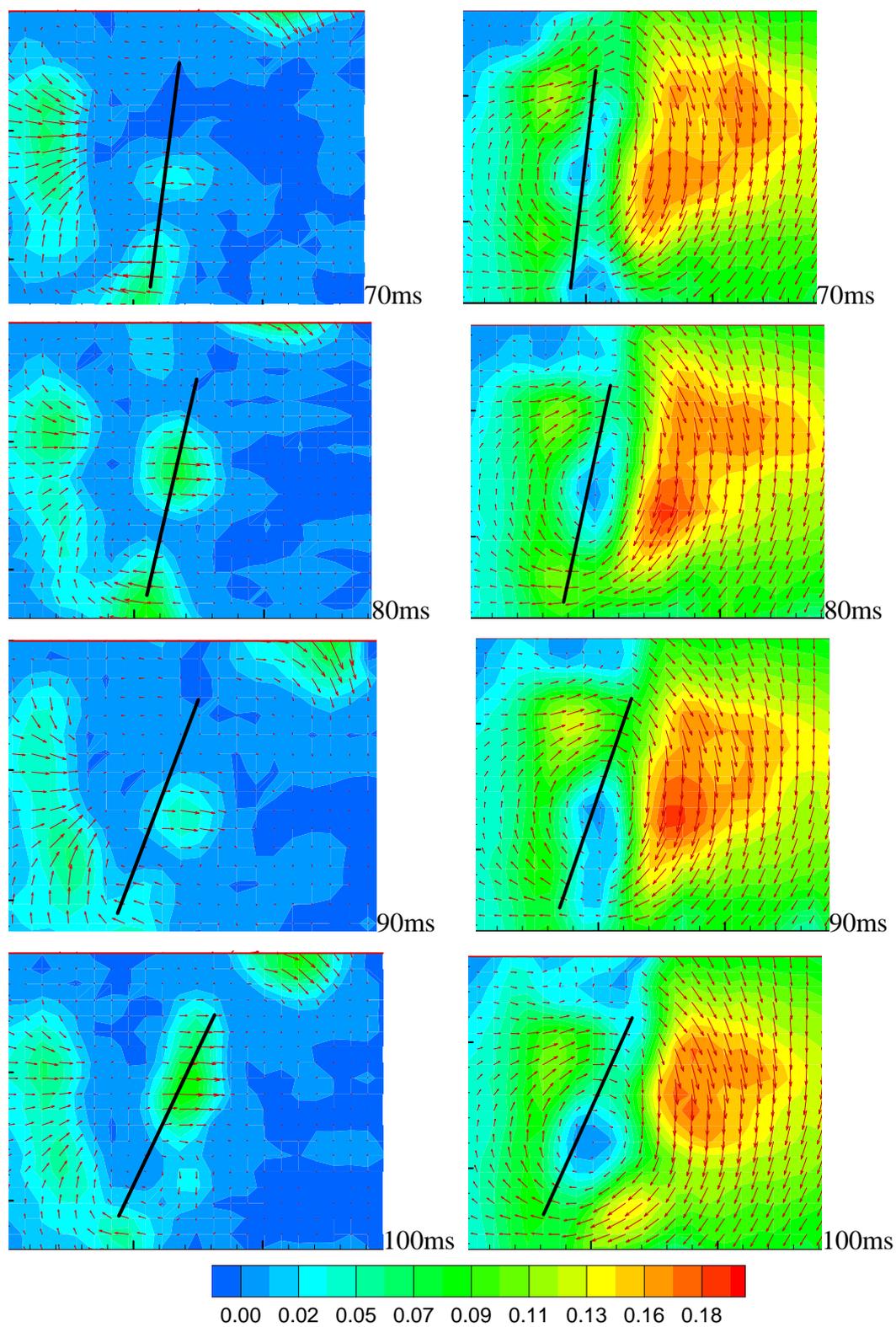


图 4.4 不同转轴位置延迟 100ms 转向过程的流场对比

Fig4.4 Flow fields of turning direction

4.4 结论

通过在对启动和转向过程的两个转轴流场的结构分析, 我们可以看出, 不轮 A 叶片或者 B 叶片在时间发展上的流场有相似的规律, 其中在启动时候, 前缘涡逐渐发展, 尾迹涡相对来说出现晚, 但是基本一致。但是不同的转轴出现的流场结构却差异很大, A 的明显要较 B 的弱, 由此, 引起的涡的强度弱于 B。所以我们通过实验得到的结论是转轴不同对流场结构有影响, 转轴前移更有利于叶片周围涡结构增强。

参考文献

- [1] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1984, 305: 1-15.
- [2] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1984, 305: 17-40.
- [3] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1984, 305: 41-78.
- [4] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamic mechanisms. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1984, 305: 79-113.
- [5] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. V. A vortex theory. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1984, 305: 115-144.
- [6] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight. VI. Lift and power requirements. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 1984, 305: 45-181.
- [7] Spedding G R., Maxworthy, T. The Generation of circulation and lift in rigid two-dimensional fling. *J Fluid Mech*, 1986, 165:247-272
- [8] Lightill M.J. on the Weis-Fogh mechanism of lift Generation. *J Fluid Mech*, 1973, 60:1-17.
- [9] Savage S, Newman B, Wong D. The role of vortices an unsteady effects during the hovering flight of dragonflies. *J Exp Biol*, 1979,83: 59-77
- [10] Spedding G R., Maxworthy, T. The Generation of circulation and lift in rigid two-dimensional fling. *J Fluid Mech*, 1986, 165:247-272
- [11] Maxworthy T. Experiments on the Weis-Fogh Mechanism of Lift Generation by Insects in

- Hovering. I. Dynamics of the Fling. *J Fluid Mech*, 1979, 93:47-63
- [12] Savage S, Newman B, Wong D. The role of vortices and unsteady effects during the hovering flight of dragonflies. *J Exp Biol*, 1979,83: 59-77
- [13] Fry S N., Sayaman R., Dickinson M H. The Aerodynamics of free-flight maneuvers in *Drosophila*. *Science*, 2003,300: 495-498
- [14] Azuma A., Azuma S., Watanabe I., et al Flight mechanics of dragonfly. *J Exp Biol*, 1985,116:79-107
- [15] Sato M., Azuma A. Flight performance of a damselfly *Ceriatagrion Selys*. *J Exp Biol*, 1997,200:1087-1096
- [16] Zbikowski, R. (2002). On aerodynamic modelling of an insect-like flapping wing in hover for micro air vehicles. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A. Math. Phys. Eng. Sci.* 360, 273-290.
- [17] Birch J M., Dickinson M H. Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature*, 2001 ,412:729-733

附录 I: 硕士研究生期间发表文章

1. J.L.Xu, **C.X.Zhao**.(2006)

Two-dimensional numerical simulations of shock waves in micro convergent-divergent nozzles. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. (In English, Submitted)

2. **C.X. Zhao**, J.L. Xu, Y. Zhang. (2006).

The three-dimensional reconstruction by fitting a stereo adapter in front of the lens of a single high speed camera and its application. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*.(In English, accepted)

3. K.Y. Cheung, Y. Zhang, **C.X. Zhao**, J.L. Xu.

A single camera stereoscopic imaging system for the investigation of kinematics and maneuvers of a domestic fly. (In English, accpeted)

4. 赵创新, 徐进良, 张永立, Y. Zhang(2005).

昆虫飞行参数测量实验研究进展. *实验力学*, Vol.20, No4. 539-548

5. 赵创新, 徐进良, Y. Zhang, 张永立.(2006).

基于单相机的昆虫自己飞行参量三维重构, *光学学报*, Vol.26, No1. 61-66

6. XU Jinliang, **ZHAO Chuangxin**, ZHANG Yongli, ZHANG Yang(2006)

Effect of flapping trajectories on the dragonfly aerodynamics. Chinese Science Bulletin. Vol.51.No.6.1-8 634 - 640

会议论文

1. J.L. Xu, W. Zhang, **C.X. Zhao**, Y.H. Gan, Q.C. Su.(2005).

Bubble dynamics and boiling heat transfer in micro scale. IASME/WSEAS International conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment

2. 赵创新, 徐进良, Y. Zhang, 张永立(2004)

苍蝇起飞过程. 首届航空航天领域中的力学问题研讨会, 四川, 成都.

致谢

本论文是在导师徐进良研究员的悉心指导下完成的，从论文选题，文献查阅，各阶段实验计划方案，论文的撰写发表等方面都得到导师的精心指点。教会我基本科研方法，指导我顺利完成研究任务，并取得成果。在此表示深深的谢意。本文是中国科学院国际重大合作项目的的一个部分，前期工作得到了曼切斯特大学 Zhang Yang 教授的支持，感谢他为三维重构提供的系列帮助。

本文的实验方面得到了实验员全朝春的大力帮助，在昆虫拍摄，在风洞搭建过程起到了不可或缺的作用，本人向他表示衷心的感谢。

已经毕业的周继军博士给予了一些建议。甘云华博士指导了实验设备的使用，章春笋博士在论文写作方面给予了热情的指导，曹海亮博士教会了实验台的设计，加工等。石秀也给予了积极的建议。以及同实验室的唐琼辉，冯毅，张伟，李银惠，张炳雷都为本论文的完成提供了各种帮助。本文的数值计算是由张永立完成的，感谢他给予 Fluent 方面的帮助，申盛在论文写作方面也给予了指导。(排名不分先后)同时也感谢实验室的秘书庞雅，奚莹，刘佳，他们提供了轻松愉快的工作学习环境。

本文的三维重构方面得到了民航学院网友小芬的帮助，图像处理的亚像素技术得到了广东工业大学网友 David 副教授的帮助。数值计算得到了哈尔滨工业大学网友 linyufeng 博士和上海大学力学所的周华博士的指点。

感谢我的家人，亲朋好友的鼓励和精神支持！

2006-3-30