

·学科进展·

昆虫运动机理研究及其应用

曾理江*

(清华大学精密仪器系,北京 100084)

[摘要] 重点介绍了目前昆虫运动机理研究中的一些关键问题和研究进展情况,以及有关测量、分析方法。

[关键词] 昆虫飞行,扇翅运动,扇翅力,计算流体力学,前缘涡,微型飞行器

引言

微型机械作为机械学科的新增长点,被普遍关注。在设计、制作微机械过程中,人们发现总体尺寸缩小后,如果仍用传统的理论概念,相应缩小每个零件的尺寸,在许多场合导致效率低下以至设计失败。因此,对于微小机构的设计,必须寻找一种与微小机械相适应的机械设计理论,而不是简单进行尺寸缩小。

人们从鸟的翅膀形状和鸟飞行原理中得到启发进行飞机的研制,作为仿生学的一部分已被人们所熟悉。但像蜻蜓、蝴蝶一样的昆虫,他们的翅膀不是像飞机那样的流线型,而是类似于平面的薄膜结构。按照传统的空气动力学,昆虫不能飞,因为这样的翅膀无法有效地利用空气的升力和阻力。因此,研究昆虫运动机理,完善现有的空气动力学理论,为微机械设计寻找新思想、新概念,成为昆虫运动仿生研究的一个热门课题。

雷诺数反映了物体运动时惯性力与粘性力的比。对于雷诺数大的物体,如鲸鱼、大鸟,其惯性力显著。它们运动时,器官所受的力主要是相对流速垂直的升力。与此相反,对于雷诺数小的生物,如蜘蛛、精子等,器官所受的力主要是相对流速平行的阻力。昆虫正好处于两者之间。从身长 10 cm 以上的蝴蝶,到 1 mm 以下的蓟马,只占很小范围的雷诺数。对于这个范围内的昆虫的飞行原理,即如何恰到好处地分别利用或同时利用空气的升力和阻力,用以往的定常、非定常流体力学很难成功地解释^[1]。

这也是目前人们对昆虫运动仿生研究所感兴趣的关键。

1 研究内容

昆虫运动仿生研究从研究内容来讲,主要包括以下 3 个部分:

(1)昆虫推进系统的研究:包括昆虫的推进器官是如何运动的,产生推进力的原理,翼型与推进效率的关系等。

(2)昆虫控制系统的研究:包括昆虫运动过程中如何协调各个器官,达到较高的运动效率;昆虫在比自身大许多的强风旋流中飞行时,如何进行各器官的协调,达到稳定的运动;对冲突等突发事件是如何进行器官保护的。

(3)昆虫生体构造的研究:包括昆虫翅膀的最优形状,运动中的变形和受力;昆虫飞行时的能量转换过程等。

由于昆虫运动仿生研究是一个交叉学科的研究。按照学科内容可划分成以下几个方面。

(1)昆虫运动参数的测量。包括翅膀形状、厚度分布、翅膀运动变形、受力等。昆虫运动参数的精密测量是分析昆虫运动机理的基础。这些测量必须结合昆虫飞行及昆虫翅膀的特点进行,因此必须对传统的测量方法进行改进。可以说它正在把计量学向一个新的领域拓宽。

(2)昆虫生理参数的测量。包括测量其呼吸、能量转换效率等,如研究各细胞的呼吸及昆虫翅膀抖动时所消耗的氧气和吸入的氧气的关系,从而对昆

* 1999 年度国家杰出青年科学基金获得者。
本文于 1999 年 12 月 16 日收到。

虫呼吸系统的氧气转换效率等生理调整机能进行研究;另一方面,测量其运动时脑神经电流,翅膀神经电流等。这部分同样也包含了新的测量方法的研究。

(3)昆虫运动机理的分析。在上面测量的基础上,用空气动力学和结构力学对昆虫运动机理进行分析。如:用计算流体力学建立三维流体可视化模型,研究昆虫飞行时翅膀周围的流线,分析其如何有效利用空气的升力和阻力。另一方面,可利用有限元法建立昆虫翅膀的三维模型,进行静变形和动变形的计算分析。对翅膀进行模拟加振实验,分析空气力引起的翅膀变形和昆虫通过肌肉控制产生的翅膀变形之间的关系。

以上3部分研究相互促进,有机结合,使昆虫运动机理的研究不断深入。下面举例介绍目前测量昆虫运动及用计算流体力学分析昆虫运动的一些方法和有关研究进展情况。

2 研究进展

2.1 测量昆虫运动和翅膀受力的光学方法

要研究昆虫运动性能,需研究昆虫翅膀构造,运动变形,升力和推进力的产生等。为此,需要开发一系列精确有效的测量方法,测量昆虫扇翅运动时各种角度变化,扇动力等多种参数。

由于各种昆虫运动特性不同,测量不同的参数所要用的方法也不同。测量昆虫翅膀弯曲和扭转振动固有频率时,利用翅膀本身纵横交错的翅脉做标记,利用纵向光学放大原理,用四象限位移传感器测量翅脉阴影的运动可同时得到翅膀弯曲和扭转固有频率。此外,利用声光调制器扫描法测量翅膀扭转变形;利用分时准直法^[2]和双波长法测量翅膀扇动力;利用干涉仪结合光学三角法测量蜻蜓翅膀形状和厚度;利用条纹投影法测量蜻蜓翅膀扇动角和扭转角;利用发散光投影法测量蜜蜂的各个运动角度^[3]等等。

这里我们以蜜蜂为例,说明测量其扇动角、扭转角和摆动角的方法,测量其扇动力的方法和利用这些测量参数分析其流体特性的方法。

传统的测量方法是用两个高速摄像机从不同的方向拍下蜜蜂扇翅运动,通过数字化研究翅膀运动。但这样做,导致高成本和系统标定困难。我们开发了发散光投影方法,可用一台高速摄像机同时测量蜜蜂的扇动角、扭转角和摆动角。图1是测量光学系统,要测量的昆虫放在范围EFGH中,被两束发散

光照明,像面上得到两个影子。通过对影象数字化,我们可以测量昆虫的扇动角、扭转角和摆动角。图2是所测量的结果。

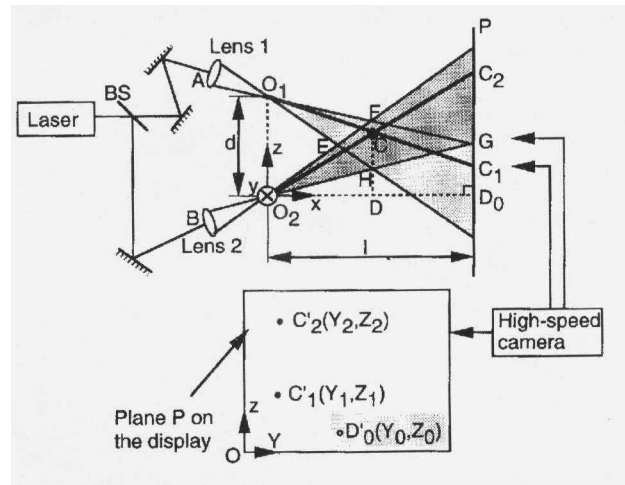
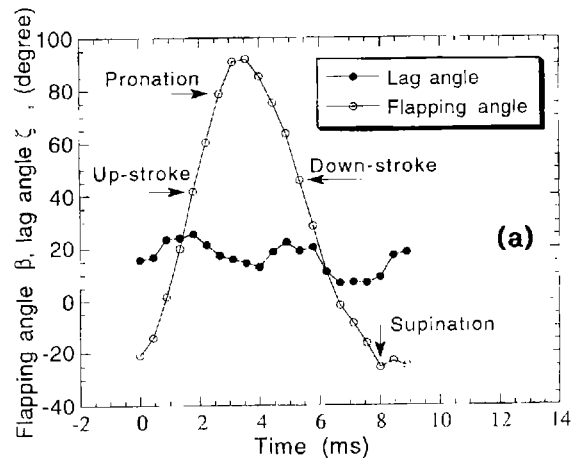
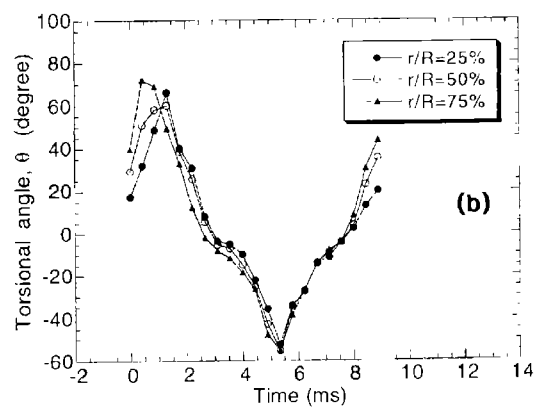


图1 测量蜜蜂扇翅运动的发散光投影光学系统



(a) 扇动角和摆动角



(b) 扭转角

图2 蜜蜂的扇翅运动

除测量昆虫运动角度外,研究昆虫运动机理需要的另一个重要参数是昆虫扇动力。测量时将昆虫

固定在一个梁上,昆虫翅膀扇动导致梁扰动,通过测量梁的扰动,可得到昆虫扇翅时的合力,即昆虫翅膀运动的惯性力与空气力的合力。惯性力可以根据翅膀的质量和翅膀运动加速度等计算出来,因此,用所测量的合力减去惯性力,即可得到所要求的空气力。这样得到的力是翅膀运动某一瞬间所受的空气力,对分析昆虫如何有效利用空气的升力和阻力十分重要。测量要求在风洞中进行。测量中要解决的一个关键问题是梁的固有频率与测量灵敏度之间的矛盾。由于是动态测量,要求梁的固有频率远远高于昆虫翅膀扇动频率。这时要求用刚度高的梁。而对于刚度高的梁,昆虫扇动引起梁的扰动较小,因此要求测量有足够高的灵敏度。目前的测量采用的是具有正方形截面的梁,其长度和截面积取决于要测量的昆虫的大小。梁被抛光成的镜面,利用激光自准直测角法,高精度测量出由于昆虫翅膀扇动所造成的瞬间梁的角度变化,标定计算出昆虫的总扇动力。要解决的一个问题是标定问题。垂直方向的静态标定可在梁上加上已知重量的重物,测量角度变化。水平方向的标定比较困难,解决的办法是利用高速光扫描切换,用一个传感器分时测量水平和垂直两个方向的角度变化,由于梁是正方形对称的,可以认为水平方向与垂直方向有相同的标定系数。测量要求扫描切换速度要远远高于翅膀扇动速度,即假设所测得的水平与垂直方向的力是同一时刻的。采用声光扫描器可以很容易地满足这一要求。动态标定可用 PZT 驱动。图 3 是测量系统,图 4 是测量结果。目前的测量灵敏度可达到 0.001 N。

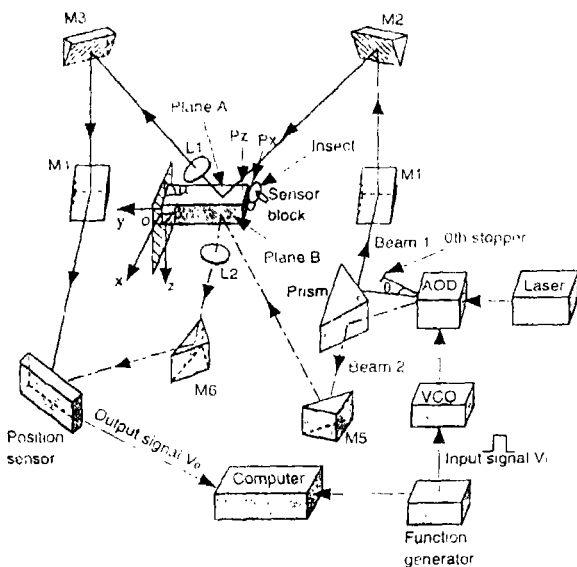


图 3 测量蜜蜂扇动力的时分准直光学系统

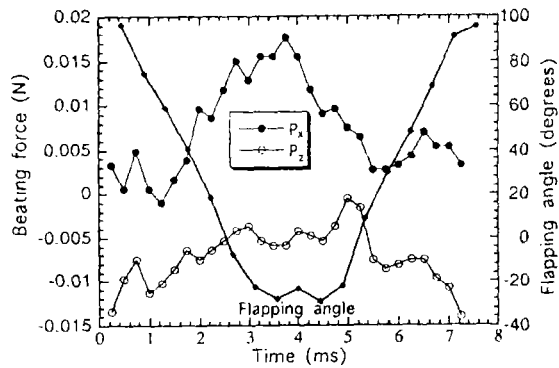


图 4 蜜蜂的扇翅力测量结果

高精度光学测量对周围环境要求较高。但是扇动力的测量是在风洞中进行的。气流的抖动对测量影响较大。为此,用双波长对气流的抖动误差进行修正。利用不同波长受大气抖动影响的相关性,可将这一误差减少 50% 以上。

2.2 昆虫运动机理的分析方法:计算流体力学 (CFD)

用计算流体分析昆虫运动流场是昆虫运动机理研究的一个重要方法。研究昆虫扇翅运动所用的模型是三维、非稳态,具有粘性结构的模型。作为 CFD 的一个研究目标,是要根据复杂的边界条件和特定的初始条件解非线性 Navier-Stokes 方程,根据所求的速度和压力,研究粘性、非稳态近场流。日本科技振兴事业团的刘浩博士将 CFD 用于生物动力学问题,使它成为一个有效的分析和实验方法^[4,5]。

分析方法包括:预处理技术和后处理技术。前者指建立运动学和几何学模型,后者指流场显示。该技术可以使一个昆虫以虚拟的方式在计算机上运动。我们可以得到更多有关流场,瞬时力等信息。成功的生物流体模型揭示了复杂的翅膀运动旋涡结构,即近场流的非稳态效应。

作为一个计算流体的例子,我们在上述动态角度测量的基础上,仿真计算翅膀周围的流场。为了研究翅膀周围的流场、速度、压力等,将所测的角度进行傅立叶变化,并进行计算流体分析。图 5 是翅膀向下扇动时翅膀周围的流场。从图中可以看出,昆虫运动时翅膀周围的流场与飞机完全不同。飞机的流线紧贴在机翼上,称“贴体”流动,若迎角太大将产生旋涡,使飞机失速。而昆虫飞行过程中,旋涡是绕在翅膀附近,并有一个轴向流。如当翅膀向下扇动时,翅膀前缘上表面有一系列微旋涡,使翅膀上表面出现低压区,因而产生升力。由于昆虫很小,很难测量其周围实际的流场,因而计算流体分析十分重

要。但在一定程度上,计算流体是应该进行实验验证的。

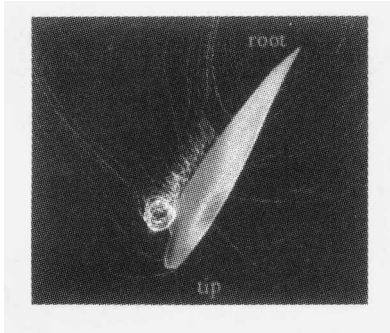


图5 蜜蜂翅膀上翻转时用计算流体力学计算的瞬时流线图

2.3 昆虫运动的前缘旋涡

用实验流体力学的方法观察昆虫运动时翅膀周围的流场可以对昆虫运动有更加直观的感性认识。方法是在测量空间撒一些轻而小的粒子或散布一些烟。用强激光带照射后,可观察到粒子的运动。用高速摄影记录下来流场,同时分析流场与昆虫运动翅膀变形的关系。这种方法只能研究某一个截面的流场,而且由于昆虫太小,对于细节很难看清。为看清细节,做一个与昆虫雷诺数相同的模型,对研究昆虫翅膀扇动时周围气流的分布情况是很有帮助的。

英国剑桥大学的 Ellington 教授为研究扇翅周围的旋涡,研制了雷诺数与天蛾(*Manduca sexta*)相同的扇翅模型——扇板^[6,7]。此扇板在下扇时产生一种强烈的前缘涡,力量很大,是对升力的一种解释。旋涡是由动态急停产生,而不是由以往假设的昆虫翅膀旋转产生。此旋涡以一定的速度由翅膀根向翅膀尖移动。另一方面,翅膀向上扇动时,产生向前的推力。

Dickinson 教授为研究翅膀扇动的空气动力学,也制作了扇翅装置^[8]。他将扇翅运动分为延迟的气流分离,转动环量和尾流获取3部分。延迟的气流分离在扇翅运动的平移部分起作用,此时翅膀以大攻角扫过空气。相反,转动环量和尾流获取在扇翅运动的转向时产生空气动力,此时翅膀快速地旋转并改变方向。除提供昆虫保持飞行的升力外,这两个旋转运动使昆虫可以控制飞行力的方向和大小。结合平动和转动,可解释昆虫的多种扇翅运动图案。

由此可见,通过制作扇翅模型,可对昆虫运动产生的旋涡和空气动力有一个比较详细的研究。

2.4 微型飞行器的制作

随着微机械制造技术的提高,研制象昆虫这样

能够扑翼飞行的微型飞行器成为目前昆虫仿生研究中的一个热门课题。日本东京大学以计算流体和实验流体为主,对昆虫运动机理进行了多年的研究。通过测量昆虫运动参数及流体可视化,对翅膀运动过程中旋涡的相互作用有了初步的认识。东京大学的另一个课题组则致力研制扑翼飞行机构^[9]。已研制成静电驱动的微扑翼机构。原理是在铝板和基板硅片之间加电压,铝板向基板运动,这时多晶硅翅膀产生弯曲。当电压变化频率与机械振动频率一致时,产生共振,振动幅度加大。另外,一种利用磁力做能源的微飞行器也正在研制中。

英国剑桥大学研究昆虫运动机理多年,他们做了一个与昆虫雷诺数相同的模型,进行风洞实验。发现了产生翅膀升力的微旋涡。根据这个发现,美国国防部组织力量研制仿昆虫的微型飞行器。设想利用微型电池做能源,带微型侦察设备飞行,并可以根据指令向前、向后或停悬。已做到50g重的微型飞行器升空并停留15s。目前要解决的主要问题除能源外,就是这种扑翼的机构和控制。

清华大学在这方面的工作主要是从综合测量昆虫运动参数入手,利用非线性理论和方法,通过测量-建模-仿真-验证的道路研究昆虫运动机理。另一个研究小组也希望研制出具有新的飞行机理的仿昆虫微型飞行器。

由此可看出目前昆虫运动机理的研究与微型飞行器的制作已经到了同步进行的时刻。在机理方面任何一点新的突破,都将给微飞行器的研制带来新的启示。

值得一提的是,日本筑波大学从另一个角度研究昆虫运动机理。他们主要研究昆虫如何对其翅膀进行有效控制。他们希望用一种特殊的刺激方式对真的昆虫进行控制。目前已做到遥控蟑螂按照指定的路线行走。

2.5 昆虫运动机理研究的新动向

最新研究表明,昆虫扇翅运动与其自由飞行时的翅膀运动有较大的差别。研究昆虫的自由飞行成为目前昆虫运动机理研究的一个趋势。重点研究其转向和飞行中所受的空气力。自由飞行的研究给测量带来了新的课题。测量整个飞行过程中身体和翅膀的姿态变化,要求有较大的测量范围;但同时又要研究翅膀变形细节,又要求较高的测量精度。目前的一种较好的测量方法是在昆虫身上安装一个类似微型陀螺的装置,测量昆虫飞行时身体姿态。但是这种方法对身体姿态可以测量的比较好,对翅膀的

变形却无法测量。另一方面,对于小型昆虫,陀螺尺寸引起的误差较大。目前正在研究一种跟踪测量的方法,实现对自由飞行昆虫大范围精确的位姿测量,我们将此方法用到测量鱼的游泳,已取得了较好的结果^[10]。

对昆虫的研究不仅涉及到空气动力学,也涉及到生物化学,结构与材料等。研究昆虫的呼吸和对能量的有效利用,研究昆虫传感体系及脑神经电流反应等也是目前昆虫运动研究的一个热点。目前一种新的测量脑神经电流的方法是利用光学图像记录法,通过傅立叶变换,得到脑神经反应图形,从而进一步研究各神经源对不同嗅觉刺激的反应^[11]。

3 结束语

为了更系统、更全面地分析昆虫运动机理,首先要开发一系列精确有效测量昆虫运动参数的测量方法,在测量的基础上用计算流体进行流场仿真和流体力学分析,并进行进一步的实验验证和分析。理论和实验结果表明,对于雷诺数小于1 000的翅膀,薄膜状的翅膀更具有优越性。而对于雷诺数小于100的情况,自然界的昆虫翅膀既有薄膜状的,又有毛发状的。当雷诺数小于10时,翅膀已不再适用。另一方面,当昆虫扇翅运动时,翅膀的截面形状发生变化,正是这些变化,使它们可以有效利用空气的升力和阻力,即下扇时产生垂直升力,上扇时产生向前的推进力。

昆虫运动仿生研究是一个多学科交叉的前沿研究领域。它涉及机械、计量、力学、生物、信息等多学科,该研究利用了各个学科的最新研究成果,同时也

把各个学科向新的领域不断拓宽。随着对昆虫运动机理研究的不断深入,空气动力学、生物、材料、信息等不同角度的昆虫运动研究成果正在相互渗透,展现昆虫的精彩世界将不再是幻想。

参 考 文 献

- [1] Ohnuki T, Kawachi K. Learning micro-mechanism from insects. *Appl Phys.*, 1995, **64**(8):822—825.
- [2] Zeng L, Matsumoto H, Kawachi K. Time-sharing collimation method for measuring the beating force of an insect. *Optical Engineering*, 1997, **36**:3 343—3 348.
- [3] Zeng L, Liu H, Kawachi K. Measurement and flow visualisation of a beating bumblebee wing. *Journal of Flow Visualisation and Image Processing*, 1996, **3**:319—327.
- [4] Liu H, Ellington C P, Kawachi K et al. A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering. *J. Exp. Bio.*, 1998, **201**:461—477.
- [5] Liu H, Kawachi K. A numerical study of insect flight. *Journal of Computational Physics*, 1998, **146**:124—156.
- [6] Martin Brookes. On a wing and a vortex. *New Scientist*, 1997, **2103**:24—27.
- [7] Ellington C P, Berg C V D, Willmott A P et al. Leading edge vortices in insect flight. *Nature*, 1996, **384**:626—630.
- [8] Dickinson M H, Lehmann F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, 1999, **284**:1 954—1 960.
- [9] Kubo Y, Shimoyama I, Miura H. Study of insect-based flying micro-robots. *IEEE International conference of robotics and automation*. Atlanta, 1993.
- [10] Tan S, Song D, Zeng L. A tracking fringe method for measuring the shape and position of a swimming fish. *Opt. Comm.* 2000, **137**:123—128.
- [11] Ai H, Okada K, Hill E S et al. Spatio-temporal activities in the antennal lobe analyzed by an optical recording method in the male silkworm moth *Bombyx mori*. *Neuroscience Letters*, 1998, **258**:135—138.

THE BIO-MECHANICS OF INSECT FLIGHT: MEASUREMENTS, ANALYSIS, MICRO-FLIGHT

Zeng Lijiang

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract We introduced here the research strategy and research methods including optical measurement methods, CFD analysis method, leading edge vortex measurement and analysis methods, moreover, a micro-flight based on the clues of insect flight.

Key words insect flight, beating motion, beating force, computational fluid dynamic, leading-edge vortices, micro-flight