

昆虫振翅飞行的数值模拟^{*}

程暮林¹, 苗文博¹, 钟长生²

(1. 北京大学 力学与工程科学系, 北京 100871;
2. 民航飞行学院 飞行技术系, 四川广汉 618307)

(叶庆凯推荐)

摘要: 在非惯性参考系下对昆虫振翅扰动的二维非定常流场进行了数值模拟, 避免了计算中的移动边界困难, 从而缩短了计算时间, 模型具有 3 个自由度, 可以模拟任意已知的翅的平面运动。通过模拟相对复杂的自然界昆虫的振翅运动, 研究昆虫是如何控制飞行。计算结果表明, 有 2 个参数可能被昆虫用来控制飞行: 翅平动和转动间的相位差以及垂直于平均振翅平面方向的横向振幅。

关键词: 昆虫飞行; 数值模拟; 相位差

中图分类号: O531 **文献标识码:** A

引 言

昆虫是地球上最为古老的物种之一。经过漫长的进化过程, 昆虫获得了令人惊叹的飞行本领, 有的昆虫能够悬停于空中, 有的能够以很小的曲率半径急速转弯等等。如果对于屋内飞行的苍蝇稍加留意, 就不难观察到这些现象。这种高度灵活的飞行能力是现有飞行机械所无法比拟的^[1-3]。因此, 关于昆虫振翅飞行原理的深入研究将有助于提高现有飞行器的性能, 更为重要的, 有助于推动微型飞行器的开发和研制。

简单的计算表明, 飞行中的昆虫翅的雷诺数是较低的, 这样按照传统空气动力学的观点, 昆虫是不能依靠振动翅膀产生足够的升力和推力的^[4-7]。通过认真观察自然界中昆虫的飞行, Weis Fogh 提出 Clap Fling 机制^[8], 之后 Lighthill^[9], Edwards 和 Cheng^[10] 采用无粘位势流理论进行了理论研究, Maxworthy^[11] 和 Spedding^[12] 进行了相关的实验研究。综合分析试验和理论的结果可以得到一个结论: 在昆虫振翅飞行过程中非定常效应起了关键的作用。最近十几年间, 随着流体力学实验技术的发展, 研究人员可以观察到昆虫翅周围流场中更加精细的流动结构, Ellington^[13] 采用吊飞昆虫进行的流场显示实验中发现了翼尖涡的存在, 以及近年来 Dickinson 等人^[14] 采用微型振翅机械的实验结果, 都对理解昆虫振翅飞行提供了有益的信息。值得一提的是, 随着计算机技术和计算方法的发展, 计算流体力学已经逐渐被应用到昆虫飞行的研究中^[15, 16]。

* 收稿日期: 2004_11_10; 修订日期: 2006_02_10

作者简介: 程暮林(1979—), 男, 辽宁大连人, 硕士(348S, Catalina Ave. 101b Pasadena, CA, USA 91106; E_mail: cheng_mulin@yahoo.com.cn);
苗文博(联系人, E_mail: tingles@126.com)。

然而,值得指出的是,除了解释昆虫是如何依靠振翅获得足够的升力外,昆虫是如何控制飞行的,也是需要同样关注的问题,并且从工程师的角度来看,后一问题更重要,更具有应用价值。如果采用计算流体的方法进行研究,类似于空气动力学中的经典问题_气动弹性问题,需要进行大量的数值计算。这样的计算如果是在固定于地面的坐标系下进行,那么必须采用运动网格等相关技术解决翅的运动边界困难,相应的,计算时间会增加,以至于在有限的时间内完成大量的计算是不现实的。本文中的计算是在固连于翅上的非惯性参考系下完成的,因此从根本上避免了运动边界问题。

1 模型简述

二维翅的平面运动具有3个自由度,本文中我们选取翅质心在惯性坐标系 XOY 下的坐标 x, y 以及翅的攻角 α , 来描述翅的平面运动。文中假定运动已知,即知道

$$x = \dot{x}(t), \quad (1)$$

$$y = \dot{y}(t), \quad (2)$$

$$\alpha = \dot{\alpha}(t), \quad (3)$$

其中, $x(t), y(t), \alpha(t)$ 是可微的。通过简单的微积分运算就可以得到平动速度 V_0 , 平动加速度 a , 转动角速度 ω , 转动角加速度 ϵ , 他们均是 x, y, α , 或其微分量的函数。昆虫振翅扰动的流场中流速较低,因此空气仍旧当作不可压缩流体处理。有研究表明昆虫翅上的细微结构会影响其附近的流动状态,从而改变气动性能,但目前我们的计算中在翅表面仍旧采用无滑移边界条件。昆虫振翅是一个快速的往复运动过程,容易产生湍流,计算中采用了标准 $k-\epsilon$ 湍流模式来模拟可能的湍流效应。如引言所述,所有的计算都是在非惯性参考系下进行的,然后把计算结果变换到惯性坐标系下。由于 NS 方程是在非惯性参考系下求解的,动量方程中体力项将包含非惯性力的成分,如下

$$F = - (a + \omega \times (\omega \times r) + \epsilon \times r + 2\omega \times V), \quad (4)$$

其中, V 是流体质点在非惯性系下的速度, r 是从翅质心到流体质点的位移矢量。此外,在惯性参考系下,流场周围的边界条件是均匀的,是不变的来流,在非惯性参考系下,情况并非如此。通过惯性和非惯性参考系之间坐标变换关系,我们得出了非惯性参考系下边界上相应的速度条件,

$$V|_{r=\infty} = -V_0 - \omega \times r_\infty, \quad (5)$$

利用 FLUENT 6.1.22 数值求解二维非常雷诺应力方程,空间方向上采用一阶迎风格式,时间方向采用一阶隐式格式,这样计算中可以采用较大的时间步长,从而加快计算。此外,编写用户子程序 UDFS (User Defined Functions), 嵌入到 FLUENT 主程序中计算惯性力和非正常边界条件。

我们采用若干具体的翅的运动模式进行了数值模拟,以显示我们方法的灵活性。这些翅的运动模式类似于自然界中昆虫的振翅行为,但是我们的方法本身对翅的平面运动没有任何限制,只要翅的运动事先已知,我们的方法都是可以计算。根据生物学资料,选取比率为 10% 椭圆形翅作为模型翅。另外,参考了文献 [15], 我们提出另外的模型以包括更加复杂的振翅运动(如图 1 所示)。

$$x = \cos\theta\zeta - \sin\theta\eta, \quad (6)$$

$$y = -\sin\theta\zeta + \cos\theta\eta, \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_0(1 - \sin(\omega_0 t + \theta_0 + \varphi_0)), \quad (8)$$

ζ 、 η 由以下公式定义

$$\zeta = \frac{A_0}{2} \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (9)$$

$$\eta = \frac{B_0}{2} \sin(\omega_1 t + \theta_0), \quad (10)$$

其中, A_0 是振翅振幅, B_0 在文中称为横向振幅, 类似的, ω_0 是振翅频率, 而 ω_1 文中称为横向振翅频率。其余的参数中, φ_0 被称为翅的平动和转动间的相位差, θ_0 和飞行的起始状态有关。

一般来说, 流场中的三维流动结构以及他们对昆虫飞行的影响是不可忽略的, 但是对于具有较长翅的昆虫, 例如蜻蜓, 二维的数值模拟可以表征昆虫飞行过程中的一些基本特征。基于上述的原因, 现阶段本文仅涉及二维昆虫振翅飞行的数值模拟。需要说明的是, 我们的方法可以比较容易的推广到更加复杂的振翅模式和三维的情形。

2 结果讨论

为了验证我们程序的可靠性和精度, 检验我们所采用的假设的合理性, 我们首先进行了一系列检验性的计算。首先, 我们计算了不同攻角下的升力和阻力系数, 同文献[14]中的试验结果进行对比, 曲线的变化趋势基本相同。其次, 采用如下模型参数, $A_0 = 2.5 \text{ cm}$, $B_0 = 0 \text{ cm}$, $f = 40 \text{ Hz}$, $\varphi_0 = 0$, $\theta_0 = 0$, 进行计算, 并将结果与文献[15]进行了对比, 发现结果相似。一个周期内 4 个不同时刻的涡量场如图 2 所示。另外与准定常的计算结果相比, 平均升力大 20%, 显示了非定常效应在昆虫振翅飞行中的存在。

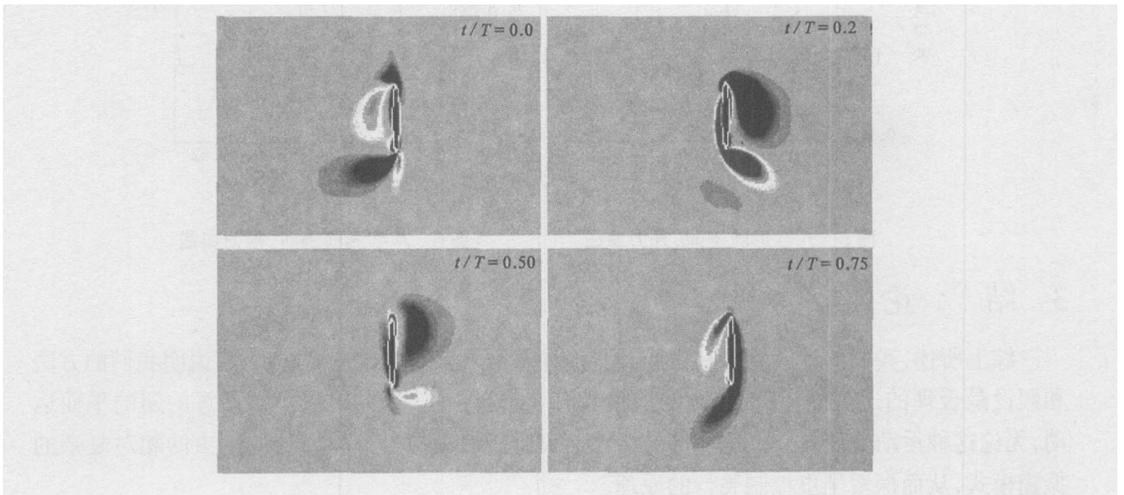


图 2 一个周期内 4 个不同时刻, 翅附近涡场等高线图

升力对平动转动间相位差的敏感性已经在文献[14]的试验中被发现, 我们在计算中也进行了细致的计算研究。模型中的参数相位差 φ_0 从 $-5/20\pi$ 到 $+5/20\pi$ 变化, 然后分别进行数值模拟。平均升力相对于相位差的变化曲线如图 3, 从图中可以清楚看到, 这种敏感性在原点附近尤为明显。

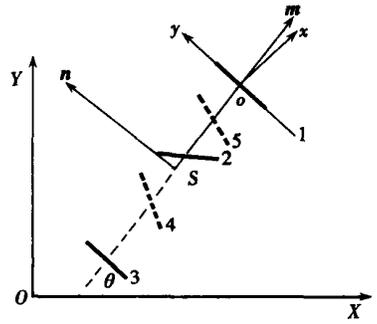


图 1 模型翅的二维拍动运动示意图

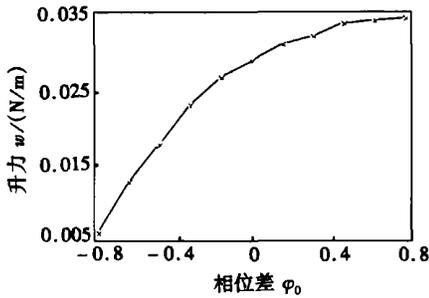
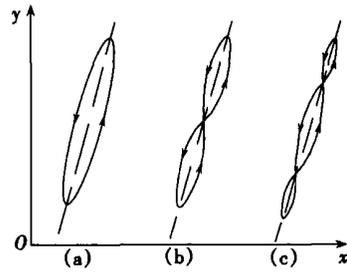
图3 平均升力随参数 φ_0 变化曲线

图4 3种不同的翅质心的轨迹示意图

显然,自然界中昆虫的拍翅运动过程中,翅的质心不可能严格沿着倾斜的平均拍翅平面运动(如图1)。生物学上的资料显示,不同种的昆虫,或是同种昆虫不同飞行状态下,翅的质心轨迹都不相同。通过仔细选择不同的横向振翅频率 ω_1 ,在我们的模型中实现了椭圆形,八字形,双八字形轨迹的数值模拟,如图所示(图4)。当翅质心轨迹为椭圆形的时候,升力和推力曲线变化很小;当翅质心沿着八字形轨迹运动时,升力曲线和推力曲线的峰值明显增大,分别如图5和图6所示。很明显,除了在峰值处相差较大外,其余时刻各条都基本重合。从控制的观点来看,横向振幅对飞行的控制作用可以看作是产生一系列脉冲信号来控制飞行,或者更加直观的说,就是昆虫通过不断的快速的“打击”自身,从而控制飞行的方向和姿态。在双八字形轨迹的数值模拟结果中这种效应更加明显。

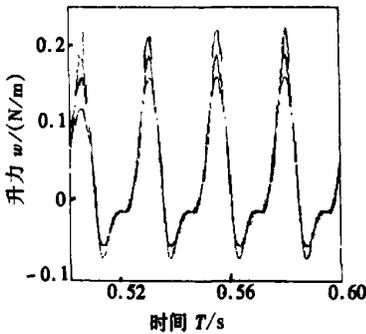


图5 八字形轨迹时,升力曲线

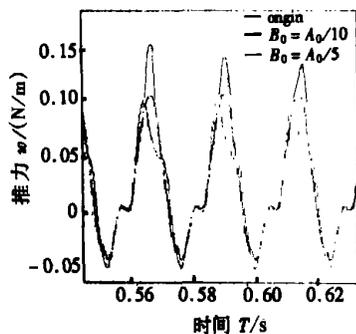


图6 八字形轨迹时,推力曲线

3 结 论

综上所述,我们的计算结果和试验及其他计算结果都能够比较好的吻合,说明我们的方法和假设是合理的。另外,我们提出的模型具有3个自由度,因此可以模拟任意的翅的平面运动,无论这种运动如何复杂。这样的灵活性使我们能够模拟自然界飞行的昆虫的相对复杂的振翅模式,从而探索昆虫控制飞行的原理。

从我们的计算结果可以肯定,昆虫利用了非定常效应来产生足够的升力,传统空气动力学就是因为忽略了这一效应而无法解释昆虫飞行的升力之谜。另一方面,我们发现,昆虫在飞行中可能通过控制两个参数来控制飞行,即翅平动转动间相位差和横向振幅。这两种控制方式的区别在于,前者是连续的作用,后者可以看作一系列的离散脉冲作用。

[参 考 文 献]

- [1] Wootton R J. Functional morphology of insect wings[J]. Annual Review of Entomology, 1992, **37**: 113—140.
- [2] Dixon A F G, Kindlmann P. Cost of flight apparatus and optimum body size of aphid migrants[J]. Ecology, 1998, **80**(5): 1670—1690.
- [3] Marden J H. Maximum lift production during takeoff in flying animals[J]. Journal of Experimental Biology, 1987, **130**: 235—258.
- [4] Sun Mao. Unsteady lift mechanisms in insect flight[J]. Advances in Mechanics, 2002, **32**(3): 425—434.
- [5] Weis Fogh T, Jensen M. Biology and physics of locust flight—II basic principles in insect flight[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences, 1956, **239**: 553—584.
- [6] Dudley T. The Biomechanics of Insect Flight [M]. Princeton: Princeton University Press, 2000, 35—47.
- [7] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight—I the quasi-steady analysis[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences, 1984, **305**: 1—15.
- [8] Weis Fogh T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production[J]. Journal of Experimental Biology, 1973, **59**: 169—230.
- [9] Lighthill M J. The Weis_Fogh mechanism of lift generation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1973, **60**(1): 1—17.
- [10] Edwards R H, Cheng H K. The separation vortex in the Weis_Fogh circulation-generation mechanism [J]. J Fluid Mech, 1982, **120**(1): 463—473.
- [11] Maxworthy T. Experiments on the Weis_Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight—Part 1 Dynamics of the clapping and fling[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, **93**(1): 47—63.
- [12] Spedding G R, Maxworthy T. The generation of circulation and lift in a rigid two-dimensional fling [J]. J Fluid Mech, 1986, **165**: 247—272.
- [13] Ellington C P, Berg C V D, Willmott A P, et al. Leading edge vortices in insect flight[J]. Nature, 1996, **384**: 626—630.
- [14] Dickinson M H, Lehmann F O, Sane S P. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight[J]. Science, 1999, **284**(5422): 1954—1960.
- [15] Jane Wang Z. Two dimensional mechanism for insect hovering[J]. Physical Review Letters, 2000, **85**(10): 2216—2219.
- [16] LAN Shi_long, SUN Mao. Aerodynamic properties of a wing performing unsteady rotational motions [J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, **33**(2): 173—182.

Numerical Simulation of Insect Flight

CHENG Mu_lin¹, MIAO Wen_bo¹, ZHONG Chang_sheng²

(1. Department of Mechanics and Engineering Science, Peking University,
Beijing 100871, P. R. China;

2. Department of Wingmanship, Civil Aviation Flight University of China,
Guanghan, Sichuan 618307, P. R. China)

Abstract: In the non_inertial coordinates attached to the model wing, the two_dimensional unsteady flow field triggered by the motion of the model wing, similar to the flapping of the insect wings, was numerically simulated. One of the advantages of our method is that it has avoided the difficulty related to the moving_boundary problem. Another advantage is that the model has three degrees of freedom and can be used to simulate arbitrary motions of a two_dimensional wing in plane only if the motion is known. Such flexibility allows us to study how insects control their flying. The results show that there are two parameters that are possibly utilized by insects to control their flight: the phase difference between the wing translation and rotation, and the lateral amplitude of flapping along the direction perpendicular to the average flapping plane.

Key words: insect flight; numerical simulation; phase difference