

# 粘性流体与刚性多联体结构相互作用的数值模拟

白 洁 张 星

中国科学院力学研究所非线性力学重点实验室, 北京, 100190

**摘 要** Childress 最近在实验中发现低雷诺数下刚性体能够在振荡来流中悬停。本文主要通过数值模拟的方法去研究这种刚性多联体结构拍动产生悬停的机制。这种多联体结构由两个刚性平板铰支连接, 在静止流场中作上下周期运动。流场的计算采用浸入边界算法。多联体的运动采用求解欧拉-拉格朗日方程的方法。从数值结果中发现多联体结构拍动可以产生升力, 并且产生的升力的大小与振幅和频率有一定的关系。

**关键字** 刚性多联体, 浸入边界方法, 弹性系数, 欧拉-拉格朗日方程

## 1. 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 人们就致力于研究拍翼非定常空气动力学, 探索昆虫在低雷诺数下的空气动力学机制。近 10 年来, 前人在活体观测, 模型翼拍动试验和数值模拟三个方面做了很多工作, 力图揭开高升力之谜。Sun<sup>[1]</sup>等按照果蝇悬停状态拍翼模型的外形及运动学数据, 做了三维、非定常数值模拟研究, 给出了拍动周期中变化的气动力以及尾涡结构的流动细节, 并提出了产生非定常升力的三个作用机制。吴江浩<sup>[2]</sup>通过数值计算比较了第一周期(不存在尾迹影响)和第四周期(存在尾迹影响)的气动力大小, 得出了“尾迹捕获”这一高升力机制一般并不存在的结论。继 Sun 对果蝇的悬停状态的研究之后, 近来研究昆虫和鸟类通过扑动翅膀而产生悬停机制的人越来越多。Stephen<sup>[3, 4]</sup>等人通过实验的研究, 测量悬停状态与振幅和频率之间的关系。

## 2. 数值方法

本文中模拟的是如图 1 所示的多联体结构, 由第一段和第二段两个单元组成, 其中由一个节点将两个单元连接起来, 在两段单元之间存在一个角弹簧, 弹簧系数如图所示为  $K$ , 不考虑阻尼作用, 将该结构放入不可压缩的黏性流中, 给定固体的铰接点在竖直方向为  $Y = A \sin(2\pi f t)$  的正弦谐波运动。采用浸入边界算法实现流体与固体的耦合, 通过计算流体网格中固体所占的体积分数来计算固体所受的力和力矩, 再将固体所受的力和力矩代入固体本构关系。固体计算采用与<sup>[5]</sup>类似的“N 段摆”模型, 根据欧拉-拉格朗日方程, 运用四阶定步长龙格库塔算法<sup>[6]</sup>, 对该问题进行求解, 具体方法请参考文献<sup>[7, 8]</sup>。求解区域为矩形, 采用均匀网格。流场初始速度为零, 计算区域的四个边界都是无滑移边界条件。

在运用 Euler-Lagrange 方程进行计算时, 该多联体结构存在三个自由度, 第一段的角度  $\theta_1$ , 第二段的角度  $\theta_2$ , 以及连接点在  $Y$  方向的运动。其中  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  分别表示第一段,

第二段与水平 X 轴负方向的夹角。

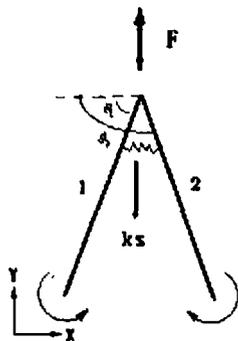


图 1 多联体结构拍动的结构图

### 3. 计算结果与分析

为了研究多联体拍动给升力带来的影响，采用了一个刚性模型进行对比，在两段多联体连接处，采用弹性系数很大的结构，抑制两段翼的拍动。这样两段翼上的所有的点的运动都与连接点指定的运动相同，即与刚体运动相似。

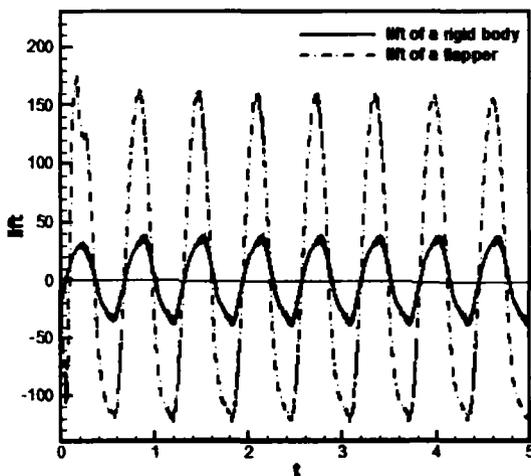


图 2  $Re=100, Y = 0.35 * \sin(10 * t)$  刚性体与多联体结构运动产生的升力与时间的关系

从图 2 可以发现对于振荡的刚体运动，流体作用在每一段上的向上的力与向下的力的大小是相等的。因而在一个时间周期内进行积分，可以发现不产生向上的升力。然而当多联体的弹性系数  $KS=50$  的时候，它能够随着连接点的运动而产生拍动时，将能产生升力，即随着时间的变化，流体对多联体产生向上方向的力大于向下方向的力。时间平均的升力为 20(特征长度为一段刚性板长，特征速度为振动速度幅值)。

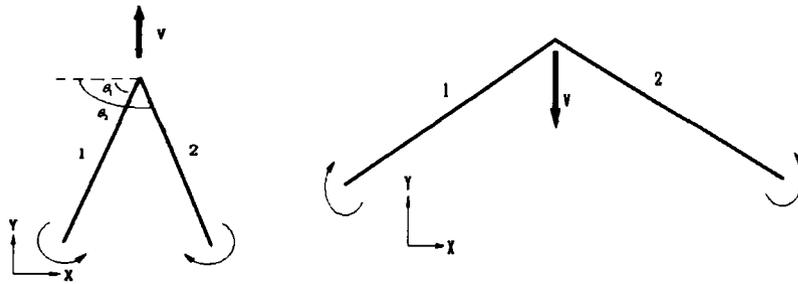


图3 多联体向上运动与向下运动的角度变化关系图

图3描述的是多联体向上和向下的运动过程，当多联体向上运动时，受到流体给的向下的力，从而使两翼向下拍动，产生升力，拍动角度 $(\theta_2 - \theta_1 - \theta_0)$ 减小。当多联体向下运动时，会受到流体给的向上的推力，从而使两翼张开，从而产生负升力，拍动角度 $(\theta_2 - \theta_1 - \theta_0)$ 增加。其中 $\theta_0$ 表示两单元之间的平衡角度。

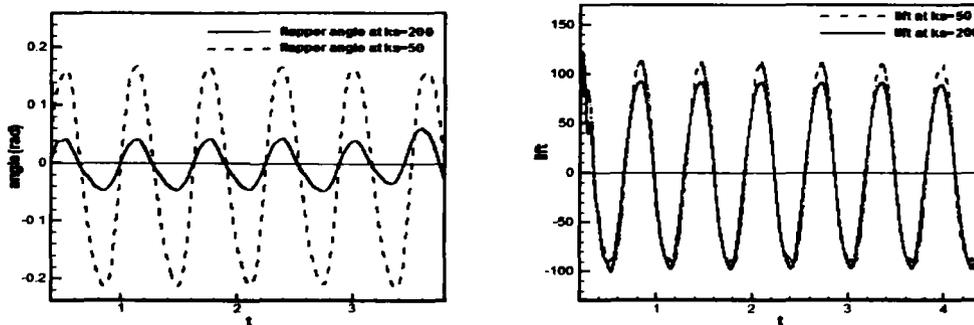
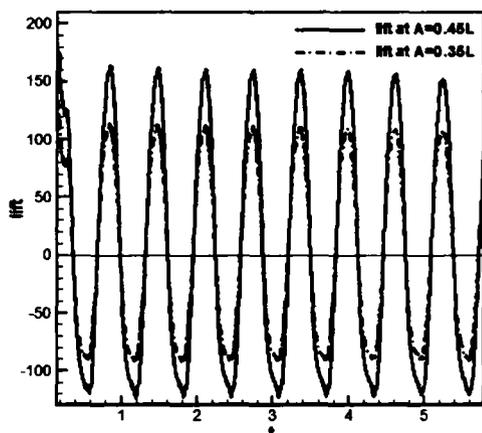
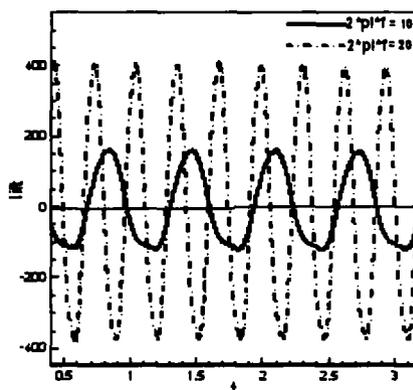


图4  $Re = 100, 2\pi f = 10, A = 0.35$ ，不同弹性系数下的拍动角度与升力随时间变化曲线

图4左图表示在不同的弹性系数下的拍动角度与升力随时间变化的图。可以发现弹性系数越小拍动角度越大。可以由右图观察到在弹性系数 $K_s=50$ 的条件下，向上的力比向下的力大，对一个周期进行时间积分，可以发现在 $K_s=50$ 的条件下产生向上的升力要大于 $K_s=200$ 的时候的升力，而在 $K_s=200$ 的时候，向上的力与向下的力几乎相互抵消。下拍过程中，两翼受到流体作用而张开，在刚性平板的边缘产生了阻力涡，刚性平板受到向上的升力。当到达最下端时，在弹簧的作用下，两翅开始合拢。上挥过程中，流体顺流，产生的阻力涡小，而且翅膀在水平方向的投影面积远小于下拍过程，所受阻力小。整个过程中的升力大于阻力，一个周期的平均受力为升力。

图5展示的是在不同的振幅条件下，升力随时间变化的曲线。虚线和实线分别描述的是 $A/L$ (其中 $A$ 为振动幅度，而 $L$ 表示每一段翼的长度)为0.35和0.45的情况下的升力，这些参数都是依据实验<sup>[3]</sup>中的数据选定的。从图中我们可以看到在 $A=0.45L$ 的情况下，升力的幅值明显加强。

图5  $Re=100$ ,  $2\pi f=10$ ,  $K_s=50$ 图6  $Re=100$ ,  $A=0.35L$ ,  $K_s=50$ , 不同频率条件下升力随时间的变化曲线

不同振幅条件下的升力随时间变化的曲线

图6是不同的振荡频率下的升力的时间变化曲线。我们可以发现在  $2\pi f=20$  的情况下的升力的幅值是频率在  $2\pi f=10$  的情况下的升力的大小的两倍。由此我们可以发现高频率的振动能带来大的升力。例如蜂鸟, 蜜蜂都是靠高频率的振动带来升力。

### 参 考 文 献

- [1] Sun M. Tang. J. Lift and power requirements of hovering flight in *Drosophila virilis*. *Journal of Experimental Biology*, 2002. 205(16): 2413-2427.
- [2] 吴江浩. 昆虫的高升力机理及果蝇, 雄蜂, 鹰蛾前飞时的气动力和能耗. 博士论文. 北京: 北京航空航天大学, 2003
- [3] Childress S, Vandenberghe N, Zhang J. Hovering of a passive body in an oscillating airflow. *Physics of Fluids*, 2006. 18(11).
- [4] Vandenberghe N, Childress S, Zhang J. On unidirectional flight of a free flapping wing. *Physics of Fluids*, 2006. 18(1).
- [5] Farnell D J J, David T, Barton D C Numerical simulations of a filament in a flowing soap film. *International Journal*, 2004. 44(3): 313-330.
- [6] 徐士良. C 常用算法程序集. 北京: 清华大学出版社, 1996. 60.
- [7] Kajishima T Takiguchi S Interaction between particle clusters and particle-induced turbulence. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002. 23(5): 639-646.
- [8] Galls S F Rediniotis O K Development of a Computational Hydrodynamic Model for a Biomimetic Underwater Autonomous Vehicle. *AIAA Journal*, 2007. 45(5): 961-971

## Numerical Simulation of the Interaction Between Rigid Multi-structure and Viscous Fluid

J. Bai<sup>1</sup>, X. Zhang<sup>2</sup>

1 The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Beijing, 100190

2 The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Beijing, 100190

**Abstract** A recent experimental study by Childress et al.(Physics of Fluids (2006) 18, 117103) shows that small flexible bodies made of stiffened tissue paper can hover in an oscillating air flow. In this paper, a numerical simulation is conducted to investigate the lift production mechanism of such 'flapper'.The multi-structure is modeled as two articulated rigid plates joined by one hinge. Instead of an oscillating flow, a harmonic motion of the articulated body in the vertical direction is assumed. The flow field is computed using an Immersed Boundary (IB) method. The state of motion of the multi-structure is determined by solving the Euler-Lagrange equations. Numerical results indicate that the flapping of the articulated body can produce lift with certain combinations of amplitude and frequency.

**Keywords** rigid multi-structure, immersed boundary method, elastic coefficient, Euler-Lagrange Equations