

天堂鸟翼凤蝶平板模型绕流特性实验研究

胡烨, 王晋军*, 张攀峰, 张草

北京航空航天大学流体力学研究所, 北京 100191

* 联系人, E-mail: jjwang@buaa.edu.cn

2008-08-19 收稿, 2008-10-24 接受

国家杰出青年科学基金(批准号: 10425207)和国防基础科研项目资助

Hu Y, Wang J J, Zhang P F, et al. Experimental investigation on the flow structure over a simplified *Papilio Ulysses* model.

Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 1026—1031, doi: 10.1007/s11434-009-0097-3

摘要 蝴蝶的扑翼飞行因其相对翼展较大、扑翼频率低等特点引起广泛关注, 尤其是具有越洋迁徙特性的蝴蝶更是备受瞩目. 本文以天堂鸟翼凤蝶这种长距离迁徙蝴蝶作为研究对象, 设计了简化模型, 应用氢气泡流动显示的方法研究该蝴蝶翼面绕流结构, 包括前缘涡、翼尖涡、翼身相交处的分离泡和马蹄形尾迹等流动结构, 并进一步讨论了各绕流结构随迎角的变化规律. 特别是在本实验条件下观测到的倒八字形前缘涡结构, 是一种新的流动现象.

关键词

天堂鸟翼凤蝶
氢气泡流动显示
绕流结构

在微型飞行器(MAVs)的研究中, 人们发现对于固定翼飞行器, 由于黏性作用不可忽略, 传统的定常气动理论对这类模型已不再适用^[1]. 但是, 小尺寸昆虫的扑翼飞行却能提供支持其体重的升力, 甚至能满足其异常敏捷的机动飞行的需求^[2,3].

昆虫的扑翼飞行既包括果蝇、蜜蜂等小翼展、高频率的扑翼运动, 也有如蝴蝶、天蛾等相对翼展较大、振动频率较低的运动方式. 由于蝴蝶飞行的特殊性, 国外很早就已经对其飞行特性进行了观测, 并获得了大量蝴蝶在自由飞行等状态下的运动形态学参数及其飞行规律^[4-6]. 在气动特性研究方面, 主要是对真实的蝴蝶进行简化, 建立数学模型, 利用计算流体力学的方法对其气动力进行计算, 通过数值模拟的方式研究蝴蝶的扑翼飞行^[7]. 然而, 数值模拟的结果是否正确、合理, 需要通过实验测量加以验证.

牛津大学的Srygley和Thomas^[8]训练红色将军蝶在风洞中自由飞行, 采用高速、高精度设备进行烟流显示实验, 定性研究了红色将军蝶翼面上的绕流流场. 他们的研究表明, 红色将军蝶在需要高升力的情况下(如起飞、降落、高速机动飞行时), 采用前缘涡机制、相对分合机制和旋转机制, 而在稳定平飞时却避免使用这些机制. 日本金泽大学的Kei等人^[9]利用

拉格朗日法在简化蝴蝶模型上采用布涡的方法计算出模型的气动力, 同时他们利用自行设计的微型测力系统对蝴蝶模型的气动力进行实验测量, 证实了利用拉格朗日法简化的数学模型的有效性. 但是, 相对于蝴蝶运动形态学的研究, 关于蝴蝶绕流结构的研究还很少见. 因此, 基于蝴蝶飞行不仅依赖于扑翼运动, 而且在一定的条件下也以滑翔的方式进行飞行的特殊性, 本文利用氢气泡流动显示技术观察具有长途迁徙特性的天堂鸟翼凤蝶模型翼面绕流结构. 重点研究蝴蝶这类相对翼展较大的昆虫翼面绕流结构及其随模型迎角的变化, 为揭示蝴蝶产生高升力的机理及深入开展仿蝴蝶微型飞行器的研究提供依据.

1 实验

实验中选用模型为天堂鸟翼凤蝶这种具有长途迁徙特性的蝴蝶, 根据蝴蝶的照片利用 Matlab 软件捕捉蝴蝶的外形轮廓, 得到用于加工的蝴蝶模型外形轮廓图, 模型的设计展长为 200 mm. 实验中水槽来流速度为 4.6 cm/s, 基于模型展长的雷诺数 $Re \approx 9 \times 10^3$, 与真实蝴蝶的飞行雷诺数接近. 蝴蝶模型采用腹撑方式水平放入水槽中, 通过攻角机构改变模型与来流之间的迎角, 迎角变化范围为 $\alpha = 4^\circ \sim 24^\circ$,

间隔为 4° 。

实验中, 铂丝分别沿展向平行于模型表面(展向布丝)或沿竖直方向垂直布置(垂向布丝), 两种布丝方式如图 1 所示。沿展向布丝时铂丝可在流向移动, 观察模型上表面在不同流向位置的绕流结构, 铂丝到模型最前端的距离为 d , 变化范围为 $d=10\sim 160$ mm, 铂丝距离蝴蝶模型上表面的高度为 H 。在垂向布丝的情况下, 铂丝可沿模型展向移动, 使氢气泡时间线显示不同展向截面内的绕流结构, 铂丝到模型对称面的距离为 L , 变化范围为 $L=0\sim 100$ mm。

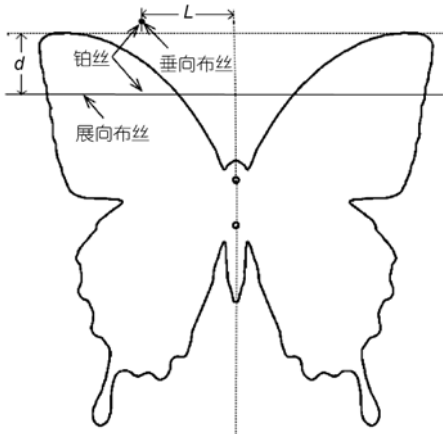


图 1 天堂鸟翼凤蝶模型及铂丝位置示意图

2 结果和讨论

2.1 蝴蝶模型上翼面绕流结构

图 2 所示为天堂鸟翼凤蝶模型在迎角 $\alpha = 8^\circ$ 时, 铂丝布置在 $d=20$ mm, $H=1$ mm 处所观察到的流动结构。图中模型上表面靠近对称面的高亮区域为前缘涡结构, 两端的高亮区域是由于模型三维效应产生的翼尖涡结构, 两种流动结构均从前缘两端, 即模型流向最前端部分反向旋转脱出, 图 2 中虚线黑色箭头所指方向为涡核的轴向速度方向。蝴蝶模型翼面上的前缘涡结构与 Srygley 和 Thomas^[8]提到的前缘涡具有一定的相似性, 均沿前缘形状分布, 涡核基本上从前缘翼端部分沿半翼展中线延伸到后半翼, 并且该前缘涡结构与三角翼前缘涡结构相反, 呈倒八字形。在前人的研究中, 前缘涡结构在蝴蝶扑翼运动时也曾观察到^[8,10], 但对于蝴蝶的平板模型, 目前还没有文献表示发现类似的绕流结构。从俯视图看, 翼尖涡从前缘翼端脱出后虽略向内倾斜, 但与流向的夹角不大, 整个涡结构从模型下翼面向上翼面翻卷, 呈绕涡核旋转的圆锥形。

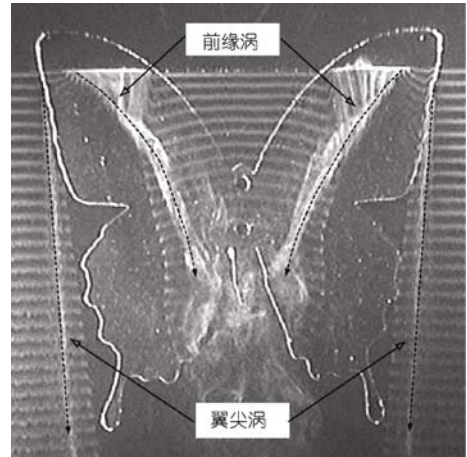


图 2 前缘涡和翼尖涡俯视图($\alpha=8^\circ$)

将铂丝沿流向移到 $d=80$ mm, $H=8$ mm 的位置, 氢气泡线显示的绕流结构如图 3 所示, 在前缘和身体相交的区域为减速区并出现分离泡。但是通过氢气泡时间线的疏密对比, 发现在蝴蝶模型的对称面内流速明显大于分离泡减速区内的流速, 与来流速度相当, 是相对于分离泡的高速区, 并且该高速区呈带状分布, 将其称为带状高速区。在图 3 中蝴蝶模型对称面内, 分离泡被该带状高速区分隔成左右两部分。在分离泡的后半部, 沿模型前缘延伸到后翼面中部的前缘涡对分离泡外侧产生诱导作用, 使分离泡外侧从外向内卷起与前缘涡具有相同旋向的涡。另外, 被带状高速区分隔的分离泡在向下游运动过程中逐渐融合, 并向分离泡内部卷吸形成展向涡结构。该展向涡和前面提到的在分离泡外侧与前缘涡具有相同旋向的涡融合, 形成类似马蹄形的半环状涡结构, 该涡结构在随流动向下游运动过程中形成涡腿从分离泡内拖出的马蹄形尾迹, 并不断扩散直至破裂。

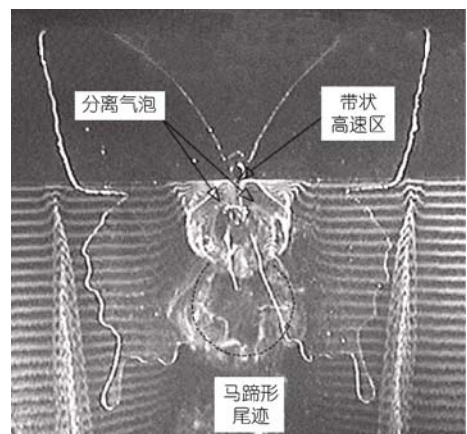


图 3 分离泡和马蹄形尾迹俯视图($\alpha=8^\circ$)

2.2 绕流结构随迎角的变化

在初步了解天堂鸟翼凤蝶模型上翼面各绕流结构的分布位置和流动形态的基础上,进一步研究模型迎角对各种流动结构的影响.

() 前缘涡和翼尖涡. 图4分别为迎角 $\alpha = 8^\circ$, 12° , 20° , 24° 时, 铂丝在展向 $d=20\text{ mm}$, $H=1\text{ mm}$ 和垂向 $L=40\text{ mm}$ 位置处氢气泡时间线所显示的流场结构, 其中左侧为展向布丝, 显示模型流场俯视图, 图中可观察到前缘涡和翼尖涡; 右侧为垂向布丝, 显示模型流场侧视图, 图中显示为上翼面前缘涡的流向截面图.

当模型迎角较小($\alpha=4^\circ$)时, 俯视图中前缘涡和翼尖涡的卷起均不明显, 且涡的强度较弱, 在侧视图中, 氢气泡时间线仅表现为表面黏性作用产生的平板表面速度型, 模型上表面大部分区域均为附着流动. 模型迎角 $\alpha=8^\circ$ 时(图4(a)), 从左侧的俯视图中可以看到前缘涡和翼尖涡的卷起. 此时涡核从前缘翼端部分脱出后沿前缘向模型对称面发展, 涡核位置离前缘较近, 呈圆弧形, 基本与前缘平行. 此时, 在蝴蝶身体附近前缘涡核靠近对称面, 同时该涡结构在蝴蝶模型身体的后端破裂. 侧视图中, 在对应前缘涡的位置上出现了小范围的分离, 但很快流动又附着到翼面上.

图4(b)中迎角 $\alpha=12^\circ$, 俯视图中翼尖涡强增大, 相对位置基本保持不变, 前缘涡涡核与 $\alpha=8^\circ$ 时的发展方向基本一致. 但相对于 $\alpha=8^\circ$, $\alpha=12^\circ$ 时涡核与对称面间距离增大, 涡破裂位置提前, 而且涡截面尺度也略有增加. 对比 $\alpha=8^\circ$ 和 $\alpha=12^\circ$ 时流动显示的俯视

图, 可见其最大的不同是在铂丝上游和前缘之间的翼端区域出现了小范围的倒流, 说明上翼面流动出现了分离, 这一点可由侧视图中分离泡范围明显增加得到验证.

当迎角从 $\alpha=12^\circ$ 增加到 $\alpha=20^\circ$ 时(图4(c)), 前缘涡核进一步向模型两侧移动, 涡的范围基本覆盖了整个前翼面, 仅在前缘涡和翼尖涡之间的翼面上还保留着部分附着流动. 铂丝上游的倒流区域基本已覆盖整个翼端, 前缘涡涡核尺寸增加, 涡核相对于 $\alpha=8^\circ$ (图4(a))不够集中, 说明涡量降低, 而且涡破裂位置上移到蝴蝶模型的前翼面. 在侧视图中, 当迎角增加到 $\alpha=20^\circ$ 时, 流动分离后已经很难再附到翼面上. 翼尖涡核在俯视图中的相对位置基本不变, 但涡的影响范围却随着迎角的增加而不断扩大, 在侧视图后部翼尖涡从下表面翻卷到上表面的现象十分明显. $\alpha=24^\circ$ 时(图4(d)), 上翼面已经完全分离, 前缘涡消失. 由于上翼面流动分离, 静压增大, 上下翼面压力差大幅下降, 由该压力差产生的翼尖涡也基本消失.

由上面的分析可知, 当模型迎角大于 4° 时, 就可以观测到明显的前缘涡结构, 从而产生涡升力, 这可能就是这类蝴蝶滑翔飞行时具有高升力的机理.

() 分离泡和马蹄形尾迹. 在翼身相交区域出现的分离泡被蝴蝶模型头部下游形成的带状高速区分隔, 当 $\alpha=4^\circ$ 时(图5(a)), 该分离泡结构对称且稳定, 而且在分离泡的下游形成涡腿从分离泡内拖出的马蹄形尾迹. 小迎角下分离泡和马蹄形尾迹的尺寸都相对较小, 而且空间位置稳定. 随着迎角增加到 $\alpha=8^\circ$

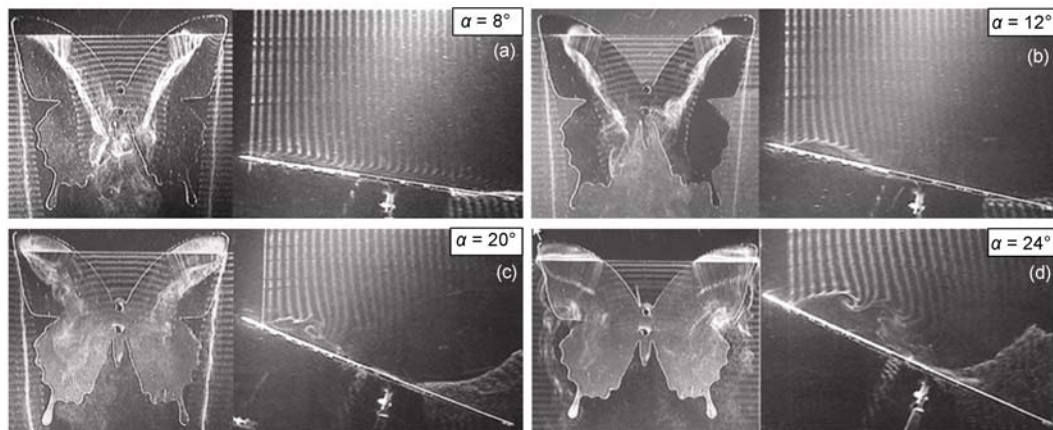


图4 前缘涡和翼尖涡随迎角变化

(a)~(d)中左侧为俯视图, 右侧为侧视图

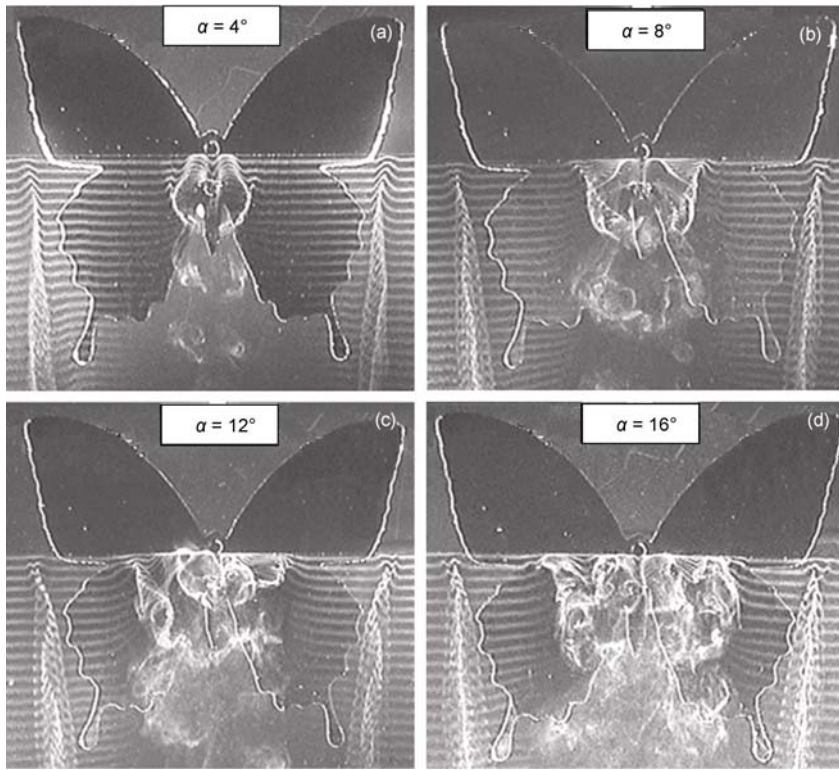


图5 分离泡和马蹄形尾迹随迎角变化的俯视图

时(图 5(b)), 分隔分离泡的带状高速区出现小幅度的左右摆动, 并带动整个分离泡结构摆动, 使中部的绕流出现不对称现象. 迎角的逐渐加大使分离泡的摆动幅度逐步增大, 同时分离泡和马蹄形尾迹的空间范围迅速扩大. 在图 5(d)中, 当 $\alpha = 16^\circ$ 时, 分离泡和尾迹的结构非常混乱, 而且被带状高速区分隔的分离泡在头部下游迅速融合在一起, 破裂形成复杂的涡流, 此时该区域约占后翼面面积的一半.

图 6 为分离泡的侧视图, 小迎角下($\alpha = 4^\circ$, 图 6(a))位于模型对称面内的带状高速区结构与模型上翼面间的距离($L = 0$ 位置处流动图案)明显低于分离泡与上翼面间的距离($L = 5$ mm 位置处流动图案). 随着迎角的增加, 分离泡与上翼面之间的夹角不断增大, 同时相同迎角下带状高速区与分离泡之间的高度差随着分离泡不稳定性的增加而逐渐减小直至消失, 如图 6(b)中 $\alpha = 16^\circ$ 时所示, $L = 0$ mm 和 $L = 5$ mm 的侧视图基本相同.

3 结论

本文对天堂鸟翼凤蝶平板模型的绕流结构进行了初步的研究, 分析了蝴蝶绕流结构及其随迎角的

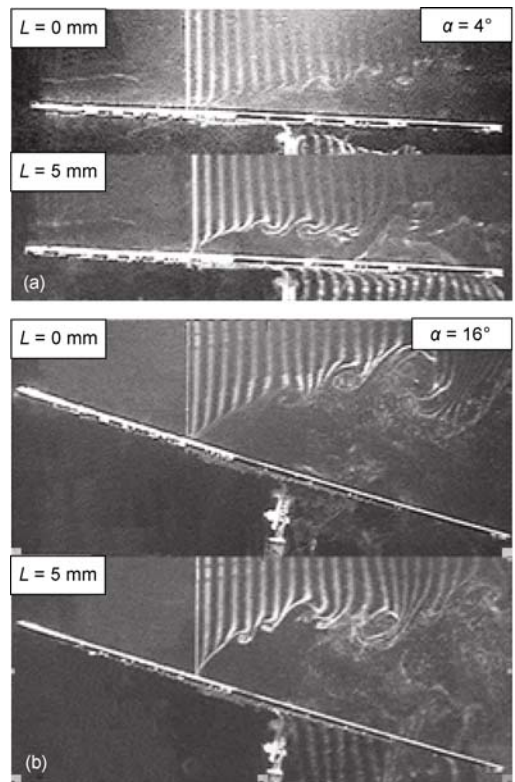


图6 分离泡和马蹄形尾迹随迎角变化侧视图

变化. 主要结论如下:

() 通过氢气泡流动显示实验观察到模型上翼面从前缘两端脱出的倒八字形前缘涡结构、基本上沿流向的翼尖涡结构以及翼身相交处被带状高速区分隔的分离泡和呈马蹄形的尾迹结构. 特别地, 前缘涡的产生是这类蝴蝶滑翔飞行时具有高升力的机理.

() 随着蝴蝶模型迎角的增加, 前缘涡强度由

弱到强再变弱, 涡核逐渐偏离模型对称面而向两侧移动, 涡破裂的位置也不断提前, 直至上翼面绕流结构完全分离, 前缘涡消失. 翼尖涡强度随迎角增加不断增强, 卷起的圆锥形区域不断增大, 当上翼面完全分离, 即上下翼面压强差基本减为零时, 翼尖涡消失. 分离泡在小迎角下流动结构较稳定, 随迎角的增加分离泡结构随中间带状高速区左右摆动, 当迎角较大时, 该分离泡和马蹄形尾迹破裂.

参考文献

- 1 王细洋. 航空概论. 北京: 航空工业出版社, 2004
- 2 Sane S P, Dickinson M H. The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight. *J Exp Biol*, 2002, 205: 1087—1096
- 3 Zbikowski R. On aerodynamic modeling of an insect-like flapping wing in hover for micro air vehicles. *Phil Trans R Soc Lond*, 2002, A360: 273—290[DOI]
- 4 Backenbury J H. Kinematics of take-off and climbing flight in butterflies. *J Zool Lond*, 1991, 244: 251—270
- 5 Betts C R, Wootton R J. Wing shape and flight behavior in butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea): A preliminary analysis. *J Exp Biol*, 1988, 138: 271—288
- 6 Dudley R. Biomechanics of flight in neotropical butterflies: Morphometrics and kinematics. *J Exp Biol*, 1990, 150: 37—53
- 7 孙茂, 黄华. 微型飞行器的仿生力学——蝴蝶飞行的气动力特性. 北京航空航天大学学报, 2006, 32: 1146—1151
- 8 Srygley R B, Thomas A L R. Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies. *Nature*, 2002, 420: 660—664[DOI]
- 9 Kei S, Masakazu S, Takanori S, et al. Study on flapping-of-wings flight of butterfly with experimental measurement. *AIAA paper*, 2004, 5368—5381
- 10 Ellington C P, van den Berg C, Willmott A P, et al. Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, 1996, 384: 626—630[DOI]

• 书 讯 •

《工程岩石力学 (上卷): 原理导论》

著者: J. A. Hudson J. P. Harrison

译者: 冯夏庭 李小春 焦玉勇 李宁 王元汉 等

书号: 978-7-03-023286-1

出版: 科学出版社 2009年1月

定价: 68元

该书是根据英国帝国理工医学院工程岩石力学课程内容和作者的工程实践经验写成的. 主要介绍岩石力学的原理、发展历程及各个时期所取得的成果, 重点强调对概念的理解, 然后从工程角度对其进行讨论. 第1~13章概述岩石力学, 第14章讨论工程系统的原理, 第15~20章介绍岩石力学在岩石工程中的应用.

该书的著者身兼教师、科研人员、工程咨询和编辑等多种身份, 因而书中内容丰富而自成一体, 行文流畅且生动有趣. 该书旨在为学生、教师、研究人员、咨询工程师和承包业者等这些涉足岩石力学与岩石工程的同行们提供一个全面的信息源.

该书可供岩土工程界及相近领域的科研、技术人员参考, 最适合相关专业的本科生、研究生作为岩石力学引论和高级岩石力学教材.

