

文章编号:1674-8190(2019)03-355-08

褶皱结构对蜻蜓后翅的气动特性影响分析

罗云,何国毅,王琦,宋航,陈冬慧

(南昌航空大学 飞行器工程学院,南昌 330063)

摘要: 褶皱结构是否能对蜻蜓后翅气动性能产生正面的影响,对蜻蜓后翅气动性能的影响是否与雷诺数(Re)相关。建立接近真实蜻蜓后翅的三维蜻蜓后翅褶皱模型和拥有同样外形的三维平板模型,利用计算流体力学方法分别计算两个模型在不同 Re 、不同攻角(α)下滑翔飞行时的气动特性。结果表明:褶皱结构的存在会明显提高蜻蜓后翅的升力,但是同时也会增大其阻力;不同 Re 情况下,褶皱结构对蜻蜓后翅气动性能的影响不同,当 $Re=1\ 000$, $\alpha=0^\circ\sim 25^\circ$ 时,蜻蜓后翅的气动效能始终略优于三维平板;褶皱结构对蜻蜓后翅气动特性的影响与 α 也相关, α 较大时蜻蜓后翅的气动效能略优于三维平板。

关键词: 蜻蜓后翅;雷诺数;滑翔;褶皱结构;计算流体力学

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.03.008

Aerodynamic Effects of Corrugation on Dragonfly Hindwing

Luo Yun, He Guoyi, Wang Qi, Song Hang, Chen Donghui

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To study aerodynamic performance of the dragonfly wing at gliding flight at different Reynolds numbers, a three-dimensional model of the dragonfly hindwing with corrugation and a three-dimensional flat plate with the same shape of the dragonfly hindwing are established. The aerodynamic effects of corrugation at gliding motion are studied using the method of computational fluid dynamics, in the Reynolds number range of 1 000 to 10 000 and angles of attack changing from 0° to 25° (with an interval of 5°). Results show that the effect of corrugation is to increase both lift and drag to varying degrees; the aerodynamic effect of wing corrugation might be Reynolds numbers dependent. While $Re=1\ 000$, aerodynamic performance of the dragonfly hindwing is slightly better than the flat plate over the entire range of parameters tested; the effect of corrugation depends on the angle of attack, while at a higher angle of attack, aerodynamic performance of the dragonfly hindwing is slightly better than the flat plate.

Key words: hindwing of dragonfly; Reynolds number; gliding flight; corrugation; computational fluid dynamics (CFD)

0 引言

蜻蜓堪称有翼昆虫界的战斗机,具有优异的飞

行本领,是微型扑翼飞行器最合适的仿生对象。蜻蜓通过振动翅膀,产生不同于周围大气的局部不稳定气流,利用气流产生的涡流上升,能在很小的推

收稿日期:2018-07-13; 修回日期:2018-09-04

基金项目:国家自然科学基金(11462015,11862017)

通信作者:何国毅,hegy509@163.com

引用格式:罗云,何国毅,王琦,等. 褶皱结构对蜻蜓后翅的气动特性影响分析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 355-362.

Luo Yun, He Guoyi, Wang Qi, et al. Aerodynamic effects of corrugation on dragonfly hindwing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 355-362.

力下翱翔^[1],甚至可以在几乎不消耗能量的情况下滑翔很长一段距离。蜻蜓高超的飞行能力更体现在它不但可以向前、后、左、右各个方向飞行,还可以进行急转、俯冲、空中悬停等高难度动作,甚至能够短距离上下垂直飞行^[2]。蜻蜓飞行常表现为拍动、滑翔和悬停等姿态,尤其是在炎热天气时,滑翔飞行更是蜻蜓最常采用的飞行方式。滑翔飞行不仅可以降低翅膀的扑动频率,减少能量消耗,还可以利用空气对流等方法进行体温调节^[3]。此外,蜻蜓单个翅膀的展弦比约为 5^[4],远大于其他昆虫,可通过消耗很少的能量得到较好的滑翔飞行能力。

目前大多数的实验研究和数值模拟计算中,人们常将蜻蜓翅膀简化为一个仅具有翅膀外轮廓的平板模型,然而在对蜻蜓翅膀形态和结构的研究中,已经证明蜻蜓翅膀结构复杂,看似一个二维平面结构,实际上是一个空间立体三维褶皱结构。蜻蜓翅膀主要由翅膜和翅脉组成,翅膜是蜻蜓翅膀的主要空气动力学结构,厚度仅为 0.04 mm^[5]。翅脉是中空圆管结构,又可分为纵脉和横脉,并且纵脉和横脉交织分布形成的脉络结构,是蜻蜓翅膀的主要承载结构。另外,蜻蜓翅膀横截面的形状沿展向上呈褶皱状,整个横截面上的厚度也有细微差异^[6]。这种褶皱结构已经被证明能够在减轻蜻蜓翅膀重量的同时,有效改善其应力分布,提高弯曲刚度和挠性,保持蜻蜓翅膀飞行时的稳定性^[7-8]。

然而,褶皱结构是否能对蜻蜓翅膀的气动性能产生正面的影响仍存在争议。R. H. Buckholz^[9]在对蜻蜓褶皱结构的实验研究中发现,褶皱结构可以降低蜻蜓翅膀的阻力、提高升力,使其拥有较好的气动性能,A. Vargas 等^[10]的理论计算研究也得到了相似的结果。相反,C. J. C. Rees^[11],B. G. Newman^[12]和 R. Rudolph^[13]的风洞实验证明,褶皱结构仅能够推迟大攻角下涡的脱落,并不能改善其空气动力学性能。X. G. Meng 等^[14]的计算研究也表明褶皱结构具有降低蜻蜓翅膀升力的作用。

不同于其他四翼昆虫,蜻蜓飞行时,其前、后翅既是相互独立又是相互影响的。滑翔飞行时,蜻蜓既可以只振动一对前翅,而将后翅伸展;也可以同时伸直前、后翅进行滑翔^[15]。目前对蜻蜓前翅的研究较多,但是对蜻蜓后翅和蜻蜓前、后翅共同作用的研究却寥寥无几。

本文在蜻蜓后翅实际结构特征的基础上,做适

当简化,建立接近真实蜻蜓后翅的三维蜻蜓后翅褶皱模型和拥有同样外形的三维平板模型,利用计算流体力学方法分别计算两个模型在不同 Re 、不同 α 下滑翔飞行时的气动特性,以探究褶皱结构对蜻蜓后翅气动性能的影响及与 Re 的相关性。

1 模型和方法

1.1 控制方程

三维不可压无量纲化的 N-S 方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中: u, v, w 分别为速度沿 x, y, z 方向的分量; p 为压强和时间, Re 为雷诺数。

$$Re = \frac{\rho U c}{\mu} \quad (5)$$

式中: ρ, U 和 μ 分别为自由流的密度、速度和动力粘性系数; c 为蜻蜓后翅的平均弦长。

对蜻蜓翅膀气动性能优劣判断的主要依据为其升力系数和阻力系数,定义分别为:

$$C_L = \frac{F_1}{0.5 \rho U^2 c} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{F_d}{0.5 \rho U^2 c} \quad (7)$$

式中: F_1 为升力; F_d 为阻力。

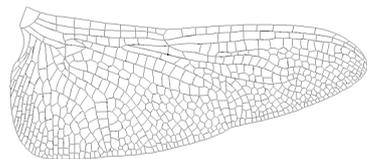
流体控制方程是以 SIMPLE 算法,采用 SST $k-\omega$ 模型,通过商业软件 STAR-CCM+ 计算完成。

1.2 几何模型

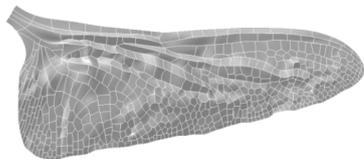
根据蜻蜓后翅的实际结构特征,本文对三维蜻蜓后翅褶皱模型做出如下四点简化:①不同姿态滑翔时,后翅可能处于前翅的尾流区,其气动特性会受到影响,故忽略滑翔时蜻蜓前翅尾流对蜻蜓后翅

气动特性的影响;②不考虑蜻蜓后翅在气动载荷作用下的变形,假设该模型为刚性,忽略柔性对其气动特性的影响;③忽略翅痣和翅结等对其气动特性影响较小的结构;④翅脉和翅膜沿展向和弦向的尺寸变化主要对蜻蜓后翅结构方面的影响较大,故忽略翅脉和翅膜沿展向和弦向的尺寸变化,将翅脉简化为厚度为 0.18 mm 的中空圆管,翅膜的厚度为 0.04 mm。

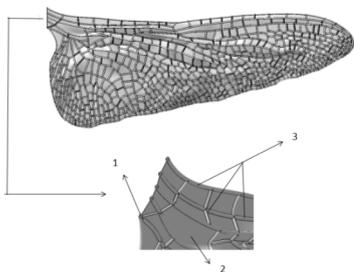
三维蜻蜓后翅褶皱模型的建立过程如图 1 所示:在建模软件 CATIA 中导入蜻蜓后翅的几何结构图,利用样条曲线描绘蜻蜓后翅轮廓,如图 1(a)所示;填充后翅轮廓形成的翅膜面,参考文献[6]中实验所得的四个横截面,通过实际测量各截面翅膜的偏转角度来偏转翅膜面,形成蜻蜓后翅的褶皱结构,如图 1(b)所示;在对应翅脉的样条曲线上建立空心圆管状翅脉,并且赋予翅脉和翅膜不同的厚度,形成厚度为 0.04 mm 的翅膜结构、厚度为 0.18 mm 的中空圆管状翅脉以及脉络结构,如图 1(c)所示,其中 1 为中空圆管状翅脉,2 为形状各异的翅膜,3 为翅脉形成的脉络结构;三维蜻蜓后翅褶皱模型如图 1(d)所示,其中 a~d 为蜻蜓后翅展向不同位置的褶皱结构。



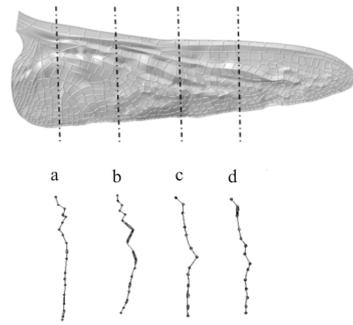
(a) 蜻蜓后翅轮廓



(b) 翅膜面偏转结构示意图



(c) 中空圆管状翅脉以及脉络结构



(d) 三维蜻蜓后翅褶皱模型

图 1 三维蜻蜓后翅褶皱模型的建立过程

Fig. 1 The process of building three-dimensional model of the dragonfly hindwing

为了探究褶皱结构对蜻蜓后翅气动效能的影响,建立拥有同样外形的三维平板模型作为对照组。三维平板模型与三维蜻蜓后翅褶皱模型的外形相同,参考面积相同,厚度也与蜻蜓后翅翅脉的外径尺寸一致,为 0.18 mm,并且对三维平板模型的外缘做圆弧处理,如图 2 所示。

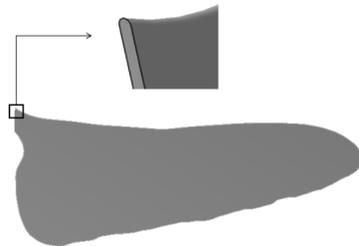


图 2 三维后翅平板模型

Fig. 2 Three-dimensional flat plate

1.3 计算流域与边界条件

建立计算流域,由前、后、左、右、顶部和底面六个面组成,尺寸如图 3 所示(其中 L 为展长)。

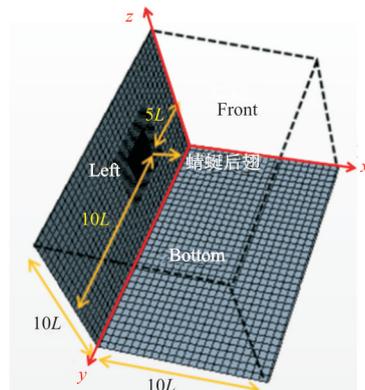


图 3 计算流域

Fig. 3 Computational domains

三维蜻蜓后翅褶皱模型的翼根处所在平面(即左面)的边界条件设置为对称面,后翅的边界条件设置为壁面。

1.4 网格无关性验证

为了排除网格尺寸对计算结果的影响,在 $Re=10\ 000$, α 为 0° 的情况下,计算了多组不同网格尺寸的网格模型。计算结果表明:当网格数量为 973 万个时,蜻蜓后翅的升力系数为 0.196,当网格数量增加至 1 375 万个甚至更多时,升力系数基本维持在 0.187,此时可以认为当网格数量大于等于 1 375 万个时,计算结果与网格数量无关,网格无关性验证趋势如图 4 所示。权衡计算效率与计算结果的准确性,最终选用网格数量为 1 375 万个,即网格尺寸为 0.04 mm 的网格模型作为求解模型,局部模型网格如图 5 所示。

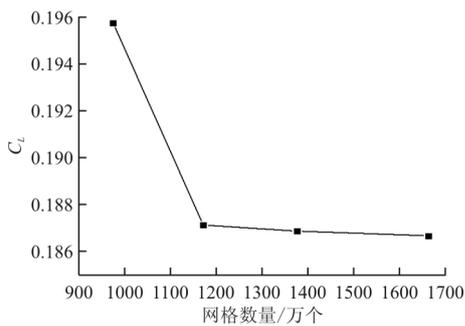
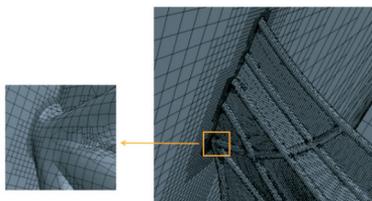
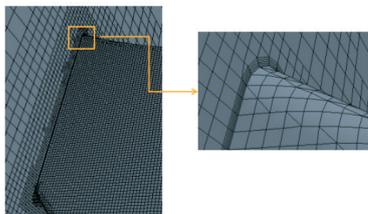


图 4 网格无关性验证趋势图

Fig. 4 Grid independence verification



(a) 三维蜻蜓后翅褶皱模型



(b) 三维平板模型

图 5 模型网格局部示意图

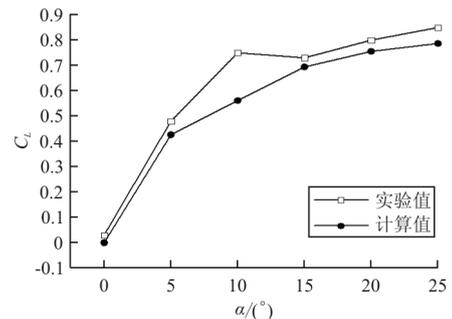
Fig. 5 Local showing of computational grid

2 结果与分析

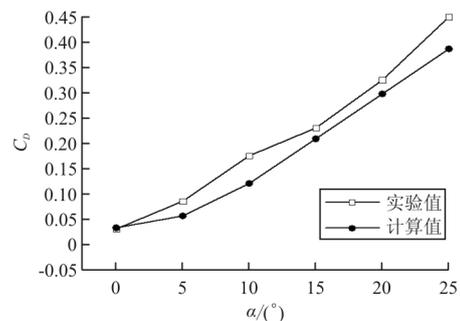
2.1 相同 Re 情况 ($Re=10\ 000$)

KESEL^[3]在 $Re=10\ 000$ 的条件下对多种具有褶皱结构的翼型剖面 and 相对应的平板模型进行了实验研究,得到了相应的升、阻力系数实验值。本文为了探究滑翔时褶皱结构对蜻蜓后翅气动效能的影响,首先计算了 $Re=10\ 000$ 时,三维平板模型和三维蜻蜓后翅褶皱模型分别在 α 介于 $0^\circ\sim 25^\circ$ 时(α 间隔为 5°)滑翔飞行的升、阻力系数。

三维平板模型的计算值与 KESEL^[3]实验值的升、阻力系数对比曲线图($Re=10\ 000$, $\alpha=0^\circ\sim 25^\circ$, α 间隔为 5°)如图 6 所示。



(a) 升力系数



(b) 阻力系数

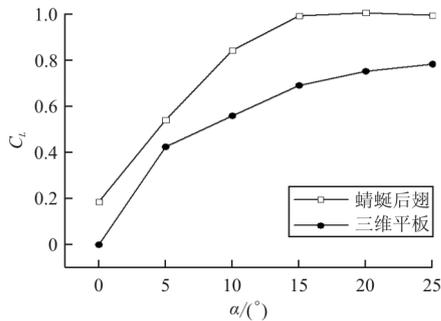
图 6 升力系数和阻力系数的计算值与 KESEL 的实验值比较 ($Re=10\ 000$)

Fig. 6 Comparison between the numerical and the experimental force coefficient of Kesel for $Re=10\ 000$ and various angles of attack

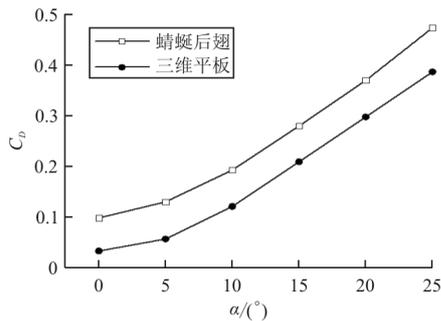
从图 6 可以看出:实验值和计算值的升、阻力系数的整体趋势是一致的,并且实验值的升力系数和阻力系数均略大于计算值,原因可能是存在一定的实验误差与计算误差。

三维蜻蜓后翅褶皱模型和三维平板模型的升、

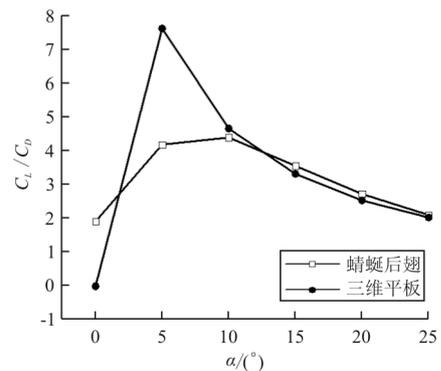
阻力系数计算值的对比曲线图 ($Re = 10\ 000$, $\alpha = 0^\circ \sim 25^\circ$, α 间隔为 5°) 如图 7 所示。



(a) 升力系数



(b) 阻力系数



(c) 升阻比

图 7 蜻蜓后翅和三维平板的升、阻力曲线 ($Re = 10\ 000$)

Fig. 7 Aerodynamic performance of dragonfly hindwing and flat plate ($Re = 10\ 000$)

从图 7(a)可以看出: $\alpha = 0^\circ \sim 25^\circ$ 时, 蜻蜓后翅的升力系数明显大于三维平板, 并且 $\alpha = 0^\circ$ 时, 三维平板的升力系数为零, 而蜻蜓后翅的升力系数为 0.19。蜻蜓后翅的升力系数随 α ($\alpha = 0^\circ \sim 25^\circ$, α 间隔为 5°) 增加的增长率分别为 65.6%、35.9%、15.0%、1.30%、-1%, $\alpha = 15^\circ \sim 25^\circ$ 时, 蜻蜓后翅升力系数增长速度明显下降; $\alpha = 0^\circ \sim 25^\circ$ 时, 三维平板的升力系数随攻角增加的增长率分别为

24.0%、19.1%、8.2%、3.9%。从图 7(b)可以看出: $\alpha = 0^\circ \sim 25^\circ$ 时, 蜻蜓后翅与三维平板的阻力系数增长趋势一致, 并且蜻蜓后翅的阻力系数计算值均大于三维平板; 从图 7(c)可以看出: $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ 时, 三维平板的气动效能明显优于蜻蜓后翅; $10^\circ < \alpha \leq 25^\circ$ 时, 蜻蜓后翅的气动效能略优于三维平板。

三维蜻蜓后翅褶皱模型 $0.2L$ (L 为展长) 截面处的流线图 ($\alpha = 20^\circ, Re = 10\ 000$) 如图 8 所示。

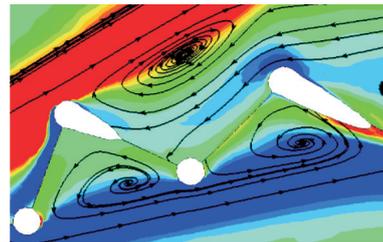


图 8 蜻蜓后翅 $0.2L$ (L 为展长) 截面处的局部流线放大图 ($\alpha = 20^\circ, Re = 10\ 000$)

Fig. 8 Streamline generated by dragonfly hindwing at $\alpha = 20^\circ$ with profile cross sections shown below at $0.2\ lrel$, where $lrel$ is the relative span length ($Re = 10\ 000$)

从图 8 可以看出: 褶皱结构上下表面的凹槽结构均被驻留涡填充, 并且上表面的驻留涡为顺时针旋转, 下表面呈逆时针旋转, 与 C. J. C. Rees^[11]、刘惠祥等^[15] 人二维褶皱结构的计算结果一致。一方面, 驻留涡填充了褶皱结构上下表面的凹槽, 使得其流动与光滑流线翼型的流动相似; 另一方面, 上下表面的驻留涡沿不同方向旋转, 使得褶皱结构的压差阻力大于三维平板, 从而使得褶皱模型的阻力系数均大于三维平板。

三维平板模型和三维蜻蜓后翅褶皱模型分别在 $0.2L$ (L 为展长, $Re = 10\ 000$) 截面处的涡量图如图 9 所示, 可以看出: 滑翔飞行时, 蜻蜓后翅和三维平板的前缘处均产生了一个较强的前缘涡, 并且两个模型的前缘涡均随 α 的增大而逐渐减小; 当 α 相同时, 蜻蜓后翅的前缘涡要大于三维平板, 而且随着 α 的增大, 尤其在较大 α 情况时, 蜻蜓后翅的前缘涡更明显的要强于三维平板。前缘涡是蜻蜓翅膀产生升力的重要原因之一, 相较于三维平板, 蜻蜓后翅的褶皱结构能够诱导出更强的前缘涡, 并且这种诱导作用随着 α 的增大而越发明显。

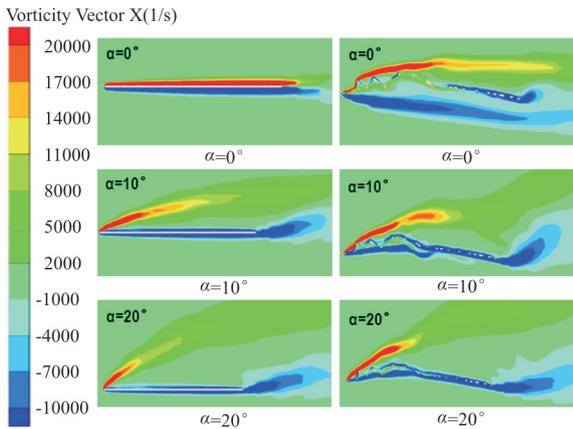


图 9 三维平板和蜻蜓后翅 $0.2L$ (L 为展长) 截面处的涡量图 ($Re=10\ 000$)

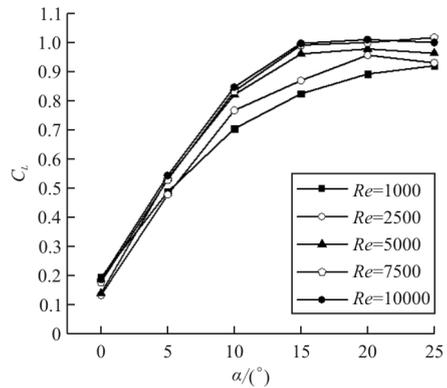
Fig. 9 Vortex of airfoil with profile cross sections shown below at $0.2\ lrel$, where $lrel$ is the relative span length ($Re=10\ 000$)

2.2 不同 Re 情况 ($Re=1\ 000\sim 10\ 000$)

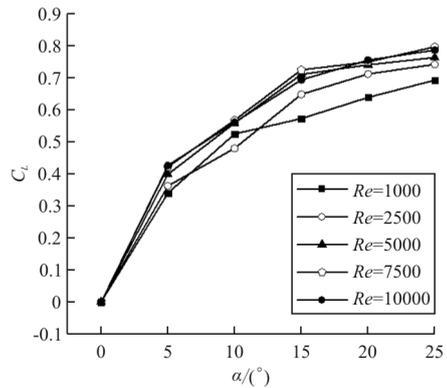
目前对蜻蜓翅膀褶皱结构的研究发现,滑翔飞行时,蜻蜓翅膀 Re 的量级一般为 $10^2\sim 10^4$ 。A. Vargas等^[10]在 α 为 5° 时,对蜻蜓翅膀褶皱结构在 Re 为 $500, 1\ 000, 5\ 000$ 和 $10\ 000$ 时的气动特性进行了理论计算研究。研究表明 $Re=10\ 000$ 时,褶皱结构能够提高蜻蜓翅膀的升力,但 Re 为其他数值时,褶皱结构的升力均比相对应的平板小。为了探究滑翔时褶皱结构对蜻蜓后翅气动效能的影响是否与 Re 相关,本文计算了三维平板模型和三维蜻蜓后翅褶皱模型 Re 为 $1\ 000, 2\ 500, 5\ 000, 7\ 500$ 和 $10\ 000$ 时滑翔飞行的升力系数与阻力系数 ($\alpha=0^\circ\sim 25^\circ, \alpha$ 间隔为 5°)。

三维蜻蜓后翅褶皱模型与三维平板模型在 Re 介于 $1\ 000\sim 10\ 000$ 时 ($\alpha=0^\circ\sim 25^\circ, \alpha$ 间隔为 5°) 的升、阻力系数计算值对比曲线图如图 10 所示。从图 10(a)和图 10(b)可以看出:随着 Re 的增大,蜻蜓后翅和三维平板的升力系数均明显增大,并且在较大 α 情况时,升力系数随 Re 的变化更明显;但是当 Re 增大到一定值时,其升力系数的大小几乎不再随 Re 的增大而增大。从图 10(c)和(d)可以看出: $Re=1\ 000$ 时, α 较小的情况下,蜻蜓后翅和三维平板的阻力系数均明显要大于其他 Re 情况。

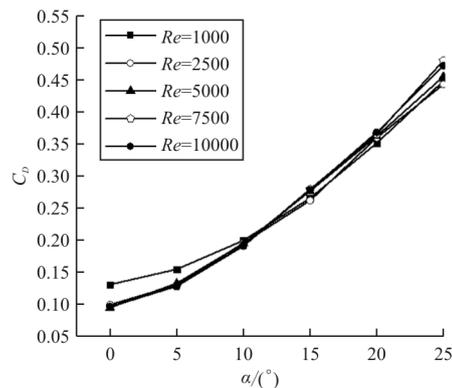
当 $Re\neq 1\ 000$ 时,在计算的所有 α 情况内,阻力系数几乎不随 Re 的变化而变化。从图 10(e)可以看出: $Re=1\ 000, \alpha=0^\circ\sim 25^\circ$ 时,蜻蜓后翅的气动效能始终略优于三维平板。当 $Re\neq 1\ 000$ 时,本文计算的其他雷诺数情况下,褶皱结构对蜻蜓后翅气动性能的影响与 α 相关: α 较小时,三维平板的气动效能明显优于蜻蜓后翅; α 较大时,蜻蜓后翅的气动效能略优于三维平板。



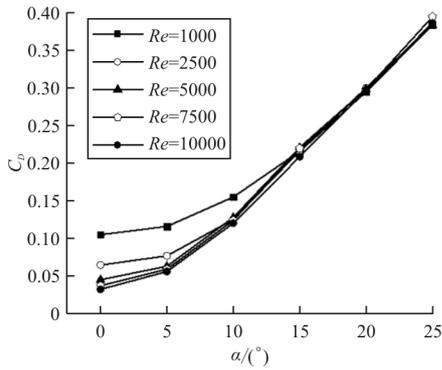
(a) 蜻蜓后翅升力系数



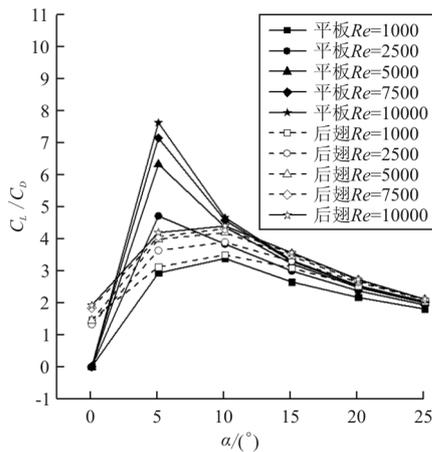
(b) 三维平板升力系数



(c) 蜻蜓后翅阻力系数



(d) 三维平板阻力系数

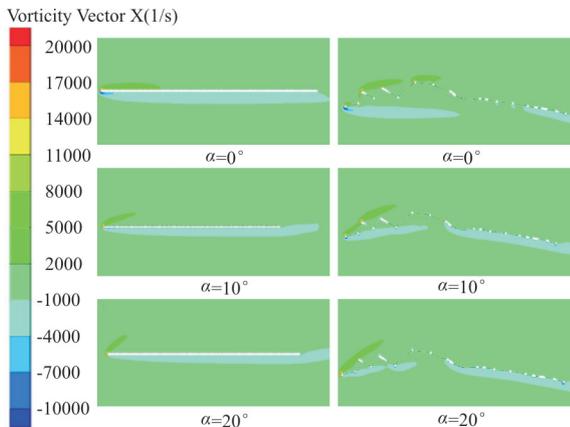


(e) 升阻比随 Re 的变化曲线

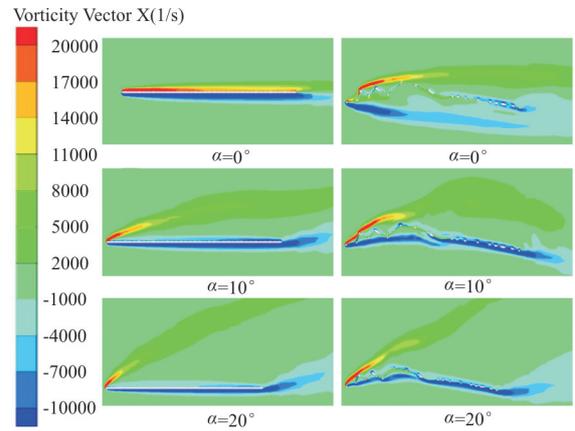
图 10 蜻蜓后翅和三维平板的升、阻力曲线(Re=1 000~10 000)

Fig. 10 Aerodynamic performance of dragonfly hindwing and flat plate(Re=1 000~10 000)

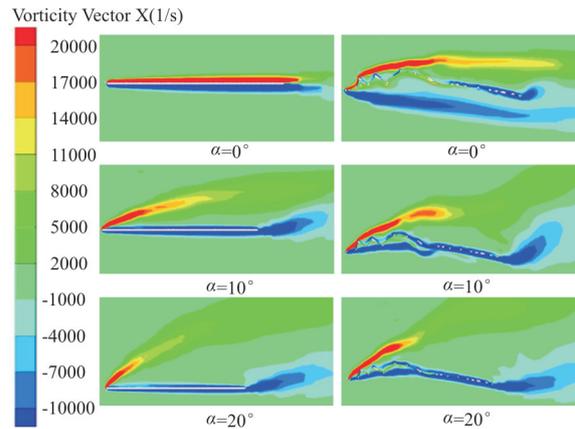
不同雷诺数下三维平板模型和三维蜻蜓后翅褶皱模型在 0.2L(L 为展长)截面处的涡量图如图 11 所示。



(a) Re=1 000



(b) Re=5 000



(c) Re=10 000

图 11 不同雷诺数下平板和蜻蜓后翅在 0.2L(L 为展长)截面处的涡量图

Fig. 11 Vortex of airfoil with profile cross sections shown below at different Reynolds numbers at 0.2 lrel, where lrel is the relative span length

从图 11 可以看出:同一 Re 情况下,蜻蜓后翅和三维平板的前缘涡均随 α 的增大而逐渐减小,并且当 α 相同时,蜻蜓后翅的前缘涡总大于三维平板的前缘涡;Re 不同时,蜻蜓后翅和三维平板的前缘涡均随 Re 的增大而增大。

3 结 论

滑翔飞行时蜻蜓后翅和三维平板的前缘处均产生了一个前缘涡,并且两个模型的前缘涡均随的增大而逐渐减小;相较于平板结构,褶皱结构的存在可以诱导出更强的前缘涡,从而使三维后翅褶皱模型的气动特性优于平板结构;在不同 Re 下滑

翔飞行时,褶皱结构对蜻蜓后翅气动特性的影响有所不同,较小 Re 情况时蜻蜓后翅的气动特性略优于三维平板。

褶皱结构的存在可以让蜻蜓在滑翔飞行时拥有更好的气动性能,当设计仿生扑翼微型飞行器时可以考虑采用褶皱结构来代替传统的平板结构,为设计性能更优的微型飞行器提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] Olberg R M, Worthington A H, Venator K R. Prey pursuit and interception in dragonflies[J]. *Journal of Comparative Physiology A, Sensory, Neural & Behavioral Physiology*, 2000, 186(2): 155-162.
- [2] Machida K, Shimanuki J. Structure analysis of the wing of a dragonfly[C]//International Conference on Experimental Mechanics and Third Conference of the Asian Committee on Experimental Mechanics. USA: International Society for Optics and Photonics, 2005: 174-175.
- [3] Kesel A B. Aerodynamic characteristics of dragonfly wing sections compared with technical aerofoils[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2000, 203(20): 3125-3135.
- [4] 李秀娟. 蜻蜓翅膀功能特性力学机制的仿生研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Li Xiujian. Bionic investigation on mechanical mechanism of dragonfly wings functional characteristics[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [5] Needham J G. Genealogic study of dragonfly wing venation [J]. *Proceedings of the United States National Museum*, 1903, 26(1331): 703-764.
- [6] Okamoto M, Yasuda K, Azuma A. Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1996, 199(2): 281-294.
- [7] Combes S A, Daniel T L. Flexural stiffness in insect wings. I. Scaling and the influence of wing venation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(17): 2979-2987.
- [8] Combes S A, Daniel T L, Combes S A, et al. Flexural stiffness in insect wings. II. Spatial distribution and dynamic wing bending[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(17): 2989-2997.
- [9] Buckholz R H. The functional role of wing corrugations in living systems[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1986, 108(1): 93-97.
- [10] Vargas A, Mittal R, Dong H. A computational study of the aerodynamic performance of a dragonfly wing section in gliding flight[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2008, 3(2): 13-20.
- [11] Rees C J C. Form and function in corrugated insect wings [J]. *Nature*, 1975, 256(5514): 200-203.
- [12] Newman B G. Model test on a wing section of a dragonfly [J]. *Scale Effects in Animal Locomotion*, 1977(3): 445-477.
- [13] Rudolph R. Aerodynamical properties of *Libellula quadrimaculata* L. (Anisoptera: Libellulidae) and the flow around smooth and corrugated wing section models during gliding flight[J]. *Odonatologica*, 1989, 7: 49-58.
- [14] Meng X G, Sun M. Aerodynamic effects of wing corrugation at gliding flight at low Reynolds numbers[J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(7): 200.
- [15] 刘惠祥, 何国毅, 罗云. 蜻蜓滑翔时前翅褶皱的流固耦合分析[J]. *科学技术与工程*, 2018(8): 144-150.
Liu Huixiang, He Guoyi, Luo Yun. Fluid-structure interaction simulation of dragonfly's forewing in gliding flight [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018(8): 144-150. (in Chinese)

作者简介:

罗云(1993-),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器气动设计。

何国毅(1968-),男,博士,副教授。主要研究方向:扑翼飞行器设计及控制、飞行器气动设计。

王琦(1963-),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器结构优化。

宋航(1991-),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器气动设计。

陈冬慧(1993-),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器气动设计。

(编辑:沈惺)