

文章编号:1000-8055(2011)07-1465-06

多段翼构型的积冰数值模拟

张 强, 高正红, 傅 林

(西北工业大学 航空学院 翼型、叶栅空气动力学国防科技重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 基于非结构网格提出一种针对多段翼构型的积冰数值模拟方法. 通过求解气体欧拉方程得到多段翼的绕流流场, 基于空气绕流流场的气流速度分布, 采用迭代法对水滴控制方程进行数值求解, 得到多段翼各翼面的水滴收集特性; 采用不同的积冰冻结模型模拟霜冰和明冰的冻结过程; 利用冰层时间推进法模拟积冰过程, 基于积冰法向生长假设生成积冰外形. 对某典型三段翼霜冰和明冰的结冰情况进行了预测研究, 根据多段翼的流场特点提出一种明冰冻结模型的求解思路, 并分析了积冰对多段翼性能的影响.

关 键 词: 积冰; 过冷水滴; 多段翼; 非结构网格; 两相流; 数值模拟

中图分类号: V244.1

文献标志码: A

Numerical simulation of ice accretions on multi-element airfoils

ZHANG Qiang, GAO Zheng-hong, FU Lin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research,
School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A numerical method based on unstructured grids was proposed to simulate ice accretions on multi-element airfoils. The air flowfield was solved using the Euler equations. Based on air velocity distribution, the governing equations for droplets were solved using an iterative method to obtain the collection efficiency. The different freezing models corresponding to the rime and glaze ice were employed to simulate the freezing process. The process of ice accretions was simulated with the assumption that ice accumulates layer-by-layer, and the ice shape was built with the assumption that ice grows in the direction normal to the airfoil surface. The rime and glaze ice accretions on a typical three-element airfoil were investigated. According to the flowfield around the airfoil, a method of computing the freezing model for glaze ice was presented. The effects of ice accretions on performance of the multi-element airfoil were also analyzed.

Key words: ice accretions; supercooled droplet; multi-element airfoil;
unstructured grid; two-phase flow; numerical simulation

飞机在飞行过程中穿越富含过冷水分的浓密云层或是遭遇冻雨等恶劣气象条件时, 飞机机翼表面会发生结冰现象, 对飞行安全形成严重威胁. 现代民航客机在起飞和着陆阶段普遍采用多段翼构型的增升装置, 而在起飞和着陆阶段, 由于飞行速度小, 飞机遭遇结冰气象条件时发生结冰的可能性较大, 又因为飞行高度较低, 遭遇结冰后飞机

难以应对结冰所带来的一系列问题, 因此对多段翼构型的结冰问题进行研究, 具有实际意义.

积冰数值模拟是飞机结冰研究广泛采用的一种手段, 国外已经开发出了一些积冰数值模拟软件^[1-4], 对于两段翼的结冰问题也进行了一些研究工作^[5-7]. 国内近些年针对积冰相关问题进行了大量的数值模拟研究, 其中对于单段翼型和机翼研

收稿日期: 2010-12-29; 修订日期: 2011-03-21

作者简介: 张强(1980—), 男, 陕西延安人, 博士, 主要从事飞机结冰问题研究.

究较多^[8-10],针对多段翼的积冰数值模拟,目前还少有报道.

本文提出一种基于非结构网格数值模拟多段翼构型积冰问题的欧拉两相流方法,对某典型三段翼在低速、大攻角飞行条件下霜冰和明冰的积冰情况进行了数值预测,并分析了积冰对多段翼性能的影响.

1 水滴控制方程的数值求解

建立水滴控制方程之前作以下假设:①作用于水滴的外力只有空气阻力、重力和空气浮升力;②水滴在运动过程中不发生热交换、不相互碰撞,物性参数不变;③将水滴看作具有等效直径的球体.

1.1 气流控制方程

根据假设①,空气控制方程与水滴控制方程不耦合,可以单独求解.对空气流动进行无黏化假设,通过求解气体欧拉方程得到多段翼的绕流流场.

1.2 水滴控制方程

根据水滴拟流体模型^[11],将分布在流场中的水滴看作是与空气流体相互渗透的拟流体.根据上述假设,水滴控制方程可以写为

$$\frac{\partial(\rho_d \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho_d \mathbf{V} \phi) = S_\phi \quad (1)$$

式中 ρ_d 为水滴表观密度, $\mathbf{V}$ 为水滴速度矢量, ϕ 和 S_ϕ 分别为广义变量和源项,在水滴连续方程和动量方程中分别取 $\phi=1$, u_d , v_d 和 $S_\phi=0$, F_x , F_y , 其中 u_d , v_d 为水滴速度分量, F_x , F_y 为水滴所受空气阻力、重力以及空气浮升力的合力沿 x 轴和 y 轴的分量,表达式为

$$F_x = \frac{0.75 \rho_d \cdot C_d Re_d \cdot \mu}{\rho_w \cdot D^2} (u_a - u_d) \quad (2)$$

$$F_y = \frac{0.75 \rho_d \cdot C_d Re_d \cdot \mu}{\rho_w \cdot D^2} (v_a - v_d) + \rho_d \cdot g \cdot \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right] \quad (3)$$

式中 u_a , v_a 为气流速度分量, ρ_a , ρ_w , μ , D , C_d , Re_d 和 g 分别为空气密度、水密度、空气分子黏度、水滴等效直径、水滴阻力系数、水滴相对空气运动的雷诺数和重力加速度.

基于空气绕流流场的气流速度分布,采用迭代法对水滴控制方程组进行数值求解,具体求解方法以及水滴流场边界条件的设置参见文献^[10].

1.3 水滴收集特性

水滴流场求解收敛后,由多段翼各翼面控制面元上的水滴表观密度 ρ_{dis} 和水滴体积通量 V_s 计

算局部水滴收集率

$$\beta = \frac{\rho_{dis} \cdot V_s}{C_{lw} \cdot U_\infty \cdot A} \quad (4)$$

其中 C_{lw} , U_∞ 和 A 分别为来流的液态水含量、来流速度和控制面元的长度.

单位时间内控制面元的水滴收集质量为

$$\dot{m}_{col} = C_{lw} \cdot U_\infty \cdot \beta \cdot A \quad (5)$$

2 积冰冻结模型

按照结冰环境温度的高低以及冻结过程的快慢,可以将积冰分为霜冰和明冰,本文针对这两种积冰各自的冻结机理,采用不同的冻结模型对其冻结过程进行模拟.

2.1 霜冰冻结模型

霜冰的结冰环境温度很低,可以认为过冷水滴撞击到结冰表面后立即冻结,不考虑冻结过程中的热力学效应.因此,单位时间多段翼各翼面控制面元的积冰质量为

$$\dot{m}_{ice} = \dot{m}_{col} \quad (6)$$

2.2 明冰冻结模型

明冰的结冰环境温度相对较高,过冷水滴与结冰表面发生碰撞后,不会立即完全冻结,未冻结的液态水在沿翼型表面回流的过程中逐渐冻结.本文基于经典 Messinger 模型^[12]的思想,在结冰表面的控制面元内建立质量平衡和热平衡方程模拟明冰的冻结过程.

通过对结冰过程中结冰表面控制面元的质量变化情况进行分析可知,单位时间进入控制面元的质量包括两部分:由水滴撞击而收集到的液态水质量 $\dot{m}_{col}$ 和由上游前一控制面元流入的液态水质量 $\dot{m}_{flowin}$,离开控制面元的质量则包括三部分:结冰质量 $\dot{m}_{ice}$ 、未冻结而流入下一控制面元的液态水质量 $\dot{m}_{flowout}$ 和蒸发及升华所引起质量损失 $\dot{m}_{es}$,质量平衡方程可以写为

$$\dot{m}_{col} + \dot{m}_{flowin} - \dot{m}_{ice} - \dot{m}_{flowout} - \dot{m}_{es} = 0 \quad (7)$$

结冰表面控制面元在结冰过程中的热量变化可以认为主要由潜热、显热、动态热以及传导热组成,热平衡方程可以写为

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i + \dot{Q}_{es} + \dot{Q}_{sincom} + \dot{Q}_{sice} + \dot{Q}_{sflowout} + \\ \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_{ad} + \dot{Q}_{kin} + \dot{Q}_{con} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\dot{Q}_i$ 和 $\dot{Q}_{es}$ 分别为结冰释放的潜热和蒸发及升华吸收的潜热; $\dot{Q}_{sincom}$ 为进入控制面元的过冷水升温到冰点温度所对应的热量变化, $\dot{Q}_{sice}$ 和

$\dot{Q}_{\text{flowout}}$ 分别为控制面元中发生结冰现象后,冻结形成的冰和未冻结的液态水由冰点温度到达平衡温度所对应的热量变化; $\dot{Q}_{\text{cv}}$ 为结冰表面和边界层边缘之间的对流换热, $\dot{Q}_{\text{ad}}$ 为气流速度由边界层边缘的 U_e 减小至结冰表面的零值所引起的绝热升温热, $\dot{Q}_{\text{kin}}$ 为水滴撞击结冰表面的撞击热; $\dot{Q}_{\text{con}}$ 为防、除冰设备产生的传导热.式(8)中各项的表达式及方程的求解方法参见文献[10].

2.3 积冰体积计算

求出多段翼各翼面所有结冰控制面元的积冰质量后,一个冰层时间步内各控制面元的积冰体积为

$$V_{\text{ice}} = \frac{\dot{m}_{\text{ice}} \cdot \Delta t}{\rho_i} \quad (9)$$

其中 $\Delta t, \rho_i$ 分别为冰层时间步长和冰密度.

3 积冰外形生成

根据多段翼各翼面控制面元的积冰体积,利用积冰法向生长假设进行积冰外形的生成.当翼型外形发生改变后,空气绕流流场随之改变,需要对结冰翼型的绕流流场重新计算,在此基础上求解水滴流场,得到翼面水滴收集特性,进而得到新的冰形.如此反复迭代直到积冰时间结束.

4 多段翼积冰模拟及分析

选择某典型三段翼作为研究对象,计算状态为:自由来流速度 $U_\infty = 68 \text{ m/s}$,攻角 $\alpha = 15^\circ$,针对典型的霜冰和明冰结冰条件,对三段翼的积冰情况进行了数值模拟,冰层时间步长取为 120 s.图 1 为三段翼的计算网格图.

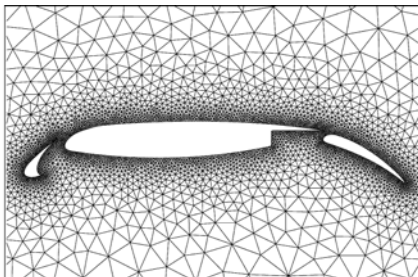
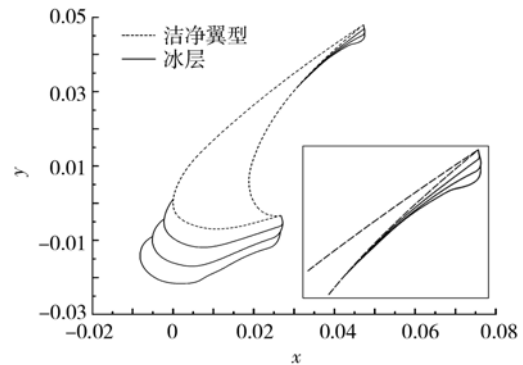


图1 三段翼的计算网格

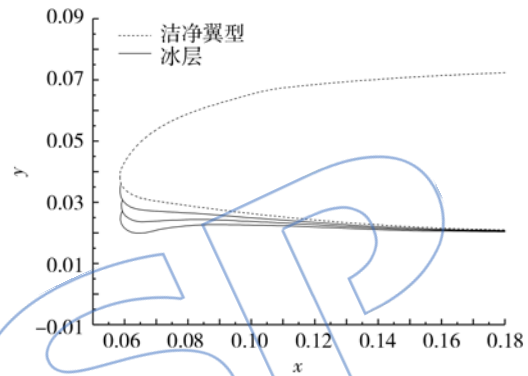
Fig. 1 Mesh of the three-element airfoil

4.1 霜冰模拟

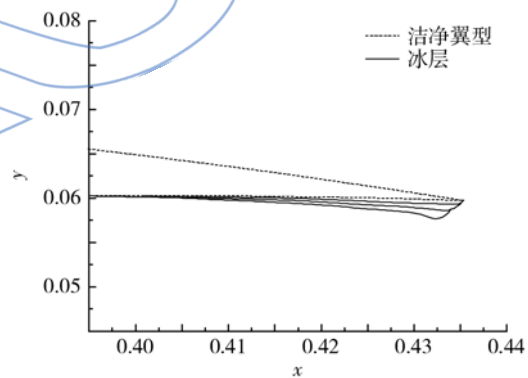
结冰条件为:结冰环境温度 $T_e = 243.15 \text{ K}$,液态水含量 $C_{lw} = 1.0 \text{ g/m}^3$,水滴平均等效直径 $D_{mv} = 20 \mu\text{m}$,积冰时间 $t = 360 \text{ s}$.图 2 为三段翼各



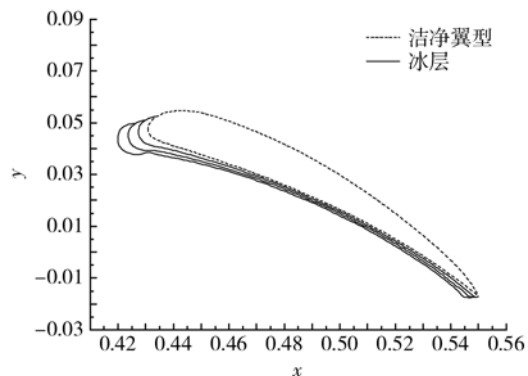
(a) 缝翼



(b) 主翼前缘



(c) 主翼后缘



(d) 襟翼

图2 三段翼各翼面的霜冰冰层形状

Fig. 2 Rime ice layers predicted on each segment of the three-element airfoil

翼面的冰层形状图。

从图 2(a)可以看出,由于来流攻角较大,使得缝翼的结冰区域主要位于翼面下方,最大积冰厚度位于翼面下方的前缘附近。根据本文的冰形预测结果,在缝翼的背风面上侧区域,也出现了积冰,如图 2(a)中副图所示。这是由于根据多段翼绕流流场的流动特点,气流会穿过缝翼和主翼的夹缝,如图 3 所示,一部分水滴就会在气流的带动下撞击到背风翼面上侧,形成积冰,本文很好地预测出了这一现象。

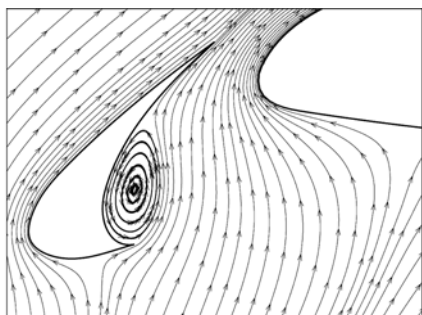


图 3 缝翼附近的流线图

Fig. 3 Streamlines around the slat

从图 2(b)可以看出,主翼上的积冰主要出现在下翼面,最大积冰厚度在下翼面前缘附近。在主翼后缘,由于有气流穿过主翼和襟翼的夹缝,如图 4 所示,一部分水滴就会在气流的带动下撞击到主翼后缘的下翼面上,形成积冰,如图 2(c)所示,这与缝翼背风面的积冰情况是类似的。

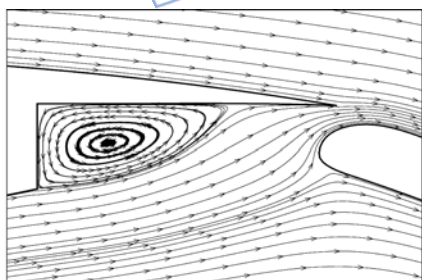


图 4 主翼后缘附近的流线图

Fig. 4 Streamlines near the trailing edge of the airfoil

从图 2(d)可以看出,由于襟翼的迎风面较大,因此水滴对襟翼的撞击区域很大,整个襟翼的下翼面以及上翼面前缘均为结冰区域,最大积冰厚度出现在翼型下翼面前缘处,下翼面其余区域由于水滴收集量较小,因此冰层很薄。

4.2 明冰模拟

在明冰的结冰条件下,结冰表面存在液态水的回流现象,通常认为液态水是在翼面附近气流的带动下沿翼型表面回流。因此,明冰冻结模型从翼面气流驻点位置开始分别沿驻点两侧翼面进行计算。对于多段翼构型,根据其流场的特点,除了缝翼迎风面的气流驻点(图 5 中 A 点)外,其背风面还存在一个气流分离再附点(图 5 中 B 点),在该点处气流也出现了沿翼面的分流现象。根据本文多段翼水滴流场的计算结果,在气流分离再附点 B 附近及其上侧的背风面区域内,也存在过冷水滴的收集,因此对于缝翼表面明冰的模拟,应当分区域考虑,如图 5 所示,将缝翼分为 CAD 和 DBC 两段区域,分别从气流驻点和背风面的气流分离再附点开始沿各自两侧的翼面求解明冰冻结模型。

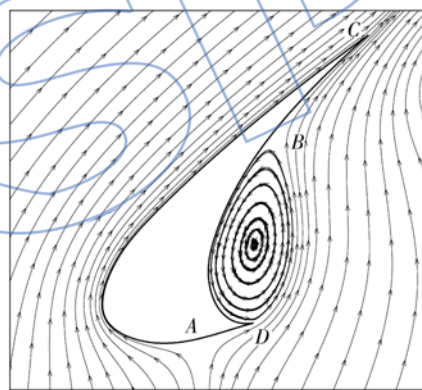


图 5 缝翼的明冰冻结模型求解示意图

Fig. 5 Illustration for performing freezing model on the slat

对于主翼,在其后缘的下翼面也存在气流分离再附点,因此采取和缝翼相同的处理方法,分区域求解明冰冻结模型,计算翼面的积冰量。

结冰条件为: $T_c = 268.15 \text{ K}$, $C_{lw} = 1.0 \text{ g/m}^3$, $D_{mv} = 20 \mu\text{m}$, $t = 240 \text{ s}$ 。图 6 为三段翼各翼面的明冰冰层形状图。

从图 6(a)可以看出,缝翼迎风面液态水的回流作用明显,积冰主要积聚在迎风面前缘,形成了具有较大厚度的冰角,而在驻点之后的区域内冰层较薄。在缝翼的背风面,由于气流分离再附点的影响,背风面后缘附近的积冰出现了明冰特有的阶梯状冰形,如图 6(a)中副图所示。

从图 6(b)可以看出,在主翼迎风面上气流驻点附近的积冰冻结量很小,在驻点之前的区域内,

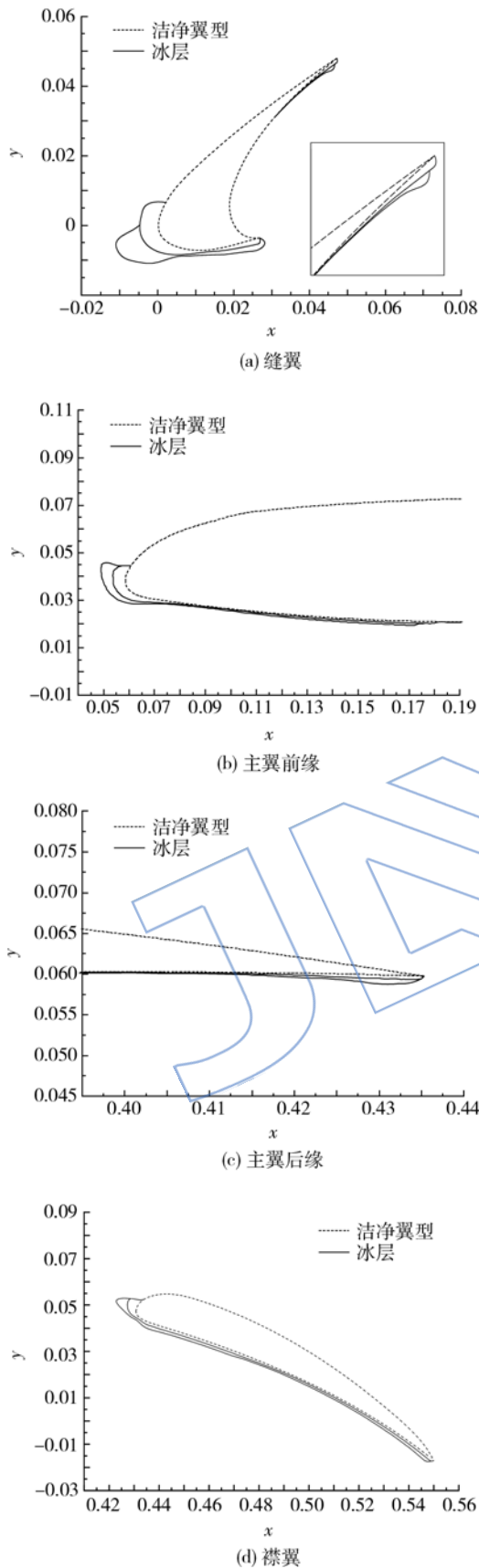


图6 三段翼各翼面的明冰冰层形状

Fig. 6 Glaze ice layers predicted on each segment of the three-element airfoil

由于过冷水滴的收集量较大,因此在主翼前缘形成了一个突出的冰角,在气流驻点之后,液态水的回流区域很大,但由于水滴收集量较小,因此冰层很薄.从图6(c)可以看出,在主翼后缘的下翼面也形成了结冰,但结冰没有出现明显的明冰特征.

从图6(d)可以看出,在襟翼前缘形成了一个尖锐的冰角,襟翼整个下翼面都为结冰区域,由于过冷水滴的收集量较小,因此冰层很薄,和图2(d)中襟翼下翼面的霜冰较为类似,但由于液态水回流作用的存在,使得下翼面的冰层厚度分布相比霜冰冰层较为均匀.

4.3 结冰对多段翼气动特性的影响

本文采用基于结构网格的 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)方程,求解了多段翼结冰前、后的绕流流场,使用了近似因式分解法进行隐式时间推进,离散格式选用 Roe 格式,采用多重网格技术加速计算,湍流模型选用 B-L(Baldwin-Lomax)模型.图7给出了多段翼洁净翼型以及霜冰和明冰结冰翼型升力系数随时间推进的变化历程.

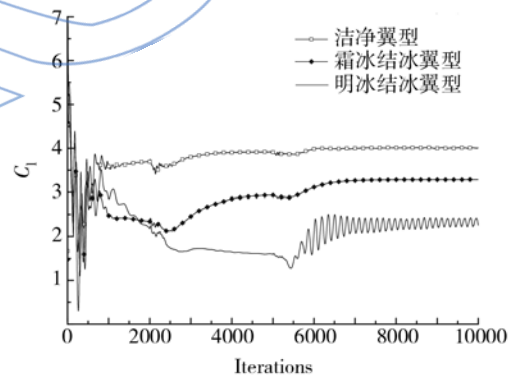


图7 多段翼升力系数随时间推进的变化历程

Fig. 7 Change process of lift coefficient for the three-element airfoil under the clear and iced configurations

由图7可以看出,多段翼结冰前的流场可视作为定常流动;对于霜冰结冰翼型,由于霜冰冰形较为规则,因此整个流场仍然可以视为定常流动;而对于明冰结冰翼型,由于明冰冰形较为复杂,对多段翼气动外形破坏较大,不仅升力大幅下降,而且流动呈现出明显的非定常特性.

多段翼洁净翼型与霜冰结冰翼型的升阻力系数对比如表1所示.由表1可以看出,多段翼表面形成霜冰后升力系数降低,阻力系数增大,并且由于多段翼的构型特点,翼面结冰后升阻特性的下

降程度相比单段翼^[10]较为严重。

表1 洁净翼型与霜冰结冰翼型的升、阻力系数对比

Table 1 Lift and drag coefficients of the clear and rime-iced airfoils

	C_l	C_d
洁净翼型	4.0	0.091
结冰翼型	3.285	0.126

图8为多段翼洁净翼型与明冰结冰翼型的流线图。从图8中可以看出,由于主翼前缘的复杂冰形,使得主翼上翼面出现了分离涡,导致升力系数的大幅下降,并且由于襟翼后缘的涡脱落,造成了升力系数的振荡。

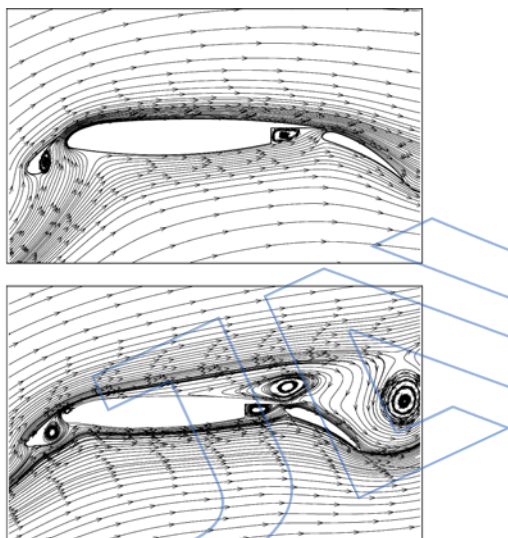


图8 洁净翼型与明冰结冰翼型的流线图

Fig. 8 Streamlines around the clear and glaze-iced airfoils

5 结论

本文基于非结构网格,采用欧拉两相流法对多段翼构型的结冰问题进行了数值模拟研究,得出以下结论:

1) 本文所选用的三段翼除迎风面以外,其缝翼背风面和主翼后缘下翼面也出现了结冰,并且由于存在气流分离再附点,采取了翼面分区算法求解明冰冻结模型,计算结果表明该方法可行。

2) 结冰对多段翼的性能会产生较为严重的影响。对于霜冰而言,结冰会引起多段翼的升阻特

性恶化,明冰则会造成多段翼流场出现明显的非定常效应,导致升力大幅下降。

3) 本方法可推广至其他多段翼构型在不同结冰气象条件和结冰时间下的结冰数值模拟。

参考文献:

- [1] Ruff G A, Berkowitz B M. User's manual for the NASA Lewis ice accretion prediction code (LEICE) [R]. NASA CR 185129, 1990.
- [2] Hedde T, Guffond D. ONERA three-dimensional icing model [J]. AIAA Journal, 1995, 33(6): 1038-1045.
- [3] Gent R W. TRAJICE2: a combined water droplet trajectory and ice accretion prediction program for aerofoils [R]. RAE-TR-90054, 1990.
- [4] Beaugendre H, Morency F, Habashi W G. FENSAP-ICE's three-dimensional in-flight ice accretion module: ICE3D [J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(2): 239-247.
- [5] Mingione G, Brandi V, Esposito B. Ice accretion prediction on multi-element airfoils [R]. AIAA 1997-0177, 1997.
- [6] Tran P, Brahimi M T, Sankar L N, et al. Ice accretion prediction on single and multi-element airfoils and the resulting performance degradation [R]. AIAA 1997-0178, 1997.
- [7] Ozgen S, Cambek M. Ice accretion simulation on multi-element airfoils using extended Messinger model [J]. Heat Mass Transfer, 2009, 45: 305-322.
- [8] 蒋胜矩, 李凤蔚. 基于 N-S 方程的翼型结冰数值模拟 [J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(5): 559-562.
JIANG Shengju, LI Fengwei. A better numerical simulation of ice accretion on airfoil [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(5): 559-562. (in Chinese)
- [9] 陈维建, 张大林. 飞机机翼结冰过程的数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 1010-1017.
CHEN Weijian, ZHANG Dalin. Numerical simulation of ice accretion on airfoils [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1010-1017. (in Chinese)
- [10] 张强, 高正红, 傅林. 非结构网格在翼型积冰数值模拟中的应用 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 977-983.
ZHANG Qiang, GAO Zhenghong, FU Lin. Application of unstructured grids in numerically simulating ice accretions on airfoils [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 977-983. (in Chinese)
- [11] Zhou L X. Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion [M]. New York: Science Press and CRC Press, 1993.
- [12] Messinger B L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1953, 20(1): 29-42.