

文章编号: 1000-8055(2003)01-0087-05

过冷水滴撞击结冰表面的数值模拟

张大林¹, 杨 曦², 昂海松¹

(1 南京航空航天大学 航空宇航学院, 北京 210016;

2 陕西飞机制造公司 设计研究所, 陕西 汉中 723213)

摘要: 为了计算过冷水滴撞击结冰表面, 本文应用雷诺平均 Navier-Stokes 方程和 $k-\epsilon$ 两方程紊流模型计算结冰表面外的空气流场。用欧拉法建立了空气中过冷水滴的运动方程, 并采用有限控制容积法对方程进行了数值计算。为了提高计算精度, 方程中的对流—扩散项采用 MUSCL 格式进行了离散。计算结果表明过冷水滴的大小和机翼攻角的变化对结冰区的大小和水收集系数的影响很大。

关键词: 航空、航天推进系统; 数值模拟; 防冰; 除冰; 水滴轨迹

中图分类号: V 211

文献标识码: A

Numerical Simulation of Supercooled Water Droplets Impingement on Icing Surfaces

ZHANG Da-lin¹, YANG Xi², ANG Hai-song¹

(1 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 Design Research Institute of Shanxi Aircraft Company, Hanzhong 723213, China)

Abstract: It is well-known that ice accretion on aircraft component would take place when an aircraft flies in clouds at sub-freezing temperature. The presence of ice accretion on unprotected aircraft airfoil can change the airfoil shape and can lead to a number of aerodynamic degradation problems. To compute the supercooled water impingement on icing surfaces, the Reynolds averaged Navier-Stokes equations and $k-\epsilon$ model are used to simulate the airflow over the surface in the present paper. A Eulerian model for air flows containing water droplet is used to compute the water droplet trajectories. The finite control volume formulation is proposed to solve the droplet problem. In order to avoid the numerical diffusion and to increase the accuracy, the MUSCL scheme is appropriated for approximating the convection terms of governing equations. The Navier-Stokes equations are solved independently from the Eulerian droplet equations. While the velocity field of airflow is achieved, the droplet flow equations can be computed. Both the airflow and droplet equations are computed on non-staggered meshes. When solving Navier-Stokes equations, the pressure-correction algorithm SIMPLE is adopted. Results show that changes in MVD and angle of attack have greater effects on impingement limits and collection efficiencies.

Key words: aerospace propulsion; numerical simulation; anti-icing; de-icing;
droplet trajectories

收稿日期: 2001- 12- 31; **修订日期:** 2002- 04- 24

作者简介: 张大林(1970-), 男, 江苏人, 南京航空航天大学航空宇航学院讲师, 在职博士生, 主要从事飞行器环境控制、计算传热学、飞机防冰系统及电子设备冷却研究

1 引言

飞机在负温云层中飞行,或具有负温表面的飞机在正温云层或无云大气中飞行时,飞机的部件迎风面会发生结冰现象。飞机升力表面结冰时会引起翼型阻力增大、升力下降、临界攻角减小,从而导致飞机的操纵性和稳定性品质恶化;而当发动机进气道及动力装置发生结冰时,会导致发动机的损坏、停车等严重后果;有时甚至少量的结冰都会导致机毁人亡的悲剧发生。为了满足适航的要求,结冰表面都需要进行防、除冰的设计,结冰表面的防、除冰系统对于飞机的操纵性能和飞行性能等是非常重要的^[1]。

在设计防、除冰系统时,需要知道飞机部件结冰表面的防护范围和该范围内结冰的数量大小,解决以上问题必须对结冰表面的结冰区和结冰量进行分析研究,通常研究的方法是冰风洞物理模拟和计算机数值模拟,本文采用数值模拟的方法计算结冰表面结冰区的大小和局部水收集系数的分布。用数值模拟方法研究防除、冰问题时,传统方法是先用数值计算的方法求解 Navier-Stokes 或 Euler 方程,得到结冰表面外空气的速度分布,在此基础上计算用拉格朗日法建立的水滴运动方程,得到水滴的运动轨迹,从而获得结冰区和结冰量的大小。另一种方法是把含有水滴的空气流动看作气液两相流动,用欧拉法建立气液两相流动的控制方程,然后用有限控制体积法数值求解控制方程,得到水滴的运动轨迹和结冰表面的局部水收集系数。两种方法的计算结果相同,但相比而言,后一种方法可以利用已有的计算网格计算水滴运动方程,直接得到结冰表面的大小和局部水收集系数,而不必如前一种方法需寻找水滴撞击极限,对于不连通的多段结冰面(如多段翼型)和三维计算,这一点尤为重要^[2,3]。

2 控制方程

2.1 控制方程

在建立控制方程时,首先要定义水滴的体积因子 α (计算网格空间内水滴的体积占整个网格体积的份额),以便于用欧拉法建立空气—水滴两相流动的控制方程。结冰云层中空气和水滴的温度相同,水滴的体积因子 α 的量级一般在 10^{-6} 左右,水滴的平均有效直径(MVD)较小,一般在微米量级,因此在建立空气的控制方程时不考虑水

滴所占体积,同时作以下假设^[4]: (1) 水滴在运动过程中和空气不发生热交换、不蒸发、物性参数不变化; (2) 水滴在运动过程中不凝聚、不分解、不变形; (3) 空气中水滴的存在不影响空气的流动,同时空气的紊流脉动不影响水滴的运动; (4) 作用在水滴上的作用力仅有粘性阻力、重力和空气浮升力。基于以上的假设,空气和水滴控制方程没有耦合关系,所建立的控制方程如下:

空气控制方程:

在笛卡尔坐标系中,定常、不可压的雷诺平均 Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

水滴控制方程:

在笛卡尔坐标系中,水滴的控制方程:

$$\frac{\partial(\alpha u_{wi})}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha u_{wi} u_{wj})}{\partial x_j} = \frac{3}{4} \alpha \frac{C_D R e_{wi}}{\rho_w d^2 / \mu} (u_i - u_{wi}) + \alpha \left(1 - \frac{\rho}{\rho_w} \right) g_i \quad (4)$$

公式(4)中:

$$R e_{wi} = \rho |u_i - u_{wi}| d / \mu$$

$$C_D R e_{wi} = 24(1 + 0.15 R e_{wi}^{0.687})$$

其中: d 为水滴直径。

2.2 紊流模型

在本文计算中采用 $k-\epsilon$ 两方程紊流模型,把雷诺应力和时均速度梯度用 Boussinesq 的涡运动粘性系数的概念联系起来时,可表达如下:

$$- \rho \overline{u_i u_j} = - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

其中:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

紊流动能方程和耗散率方程可写成:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\alpha_k} \right) \frac{k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\alpha_\epsilon} \right) \frac{\epsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$c_{el}P_k - c_{el}\rho\frac{\epsilon^2}{k} \tag{7}$$

公式(6)、(7)中:

$$P_k = -\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

以上方程中的常数为:

$$c_\mu = 0.09, \quad c_{el} = 1.44, \quad c_{\epsilon} = 1.92$$
$$c_{\epsilon 3} = 1.44, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\epsilon = 1.22$$

2.3 水收集系数

水收集系数是指结冰表面的法向水滴流量,是决定结冰表面冰增长的重要参数。应用欧拉法的控制方程在计算水收集系数时非常方便,只需计算出计算网格中距结冰面第一内点的法向水滴速度,其计算式如下:

$$\beta = -\alpha\frac{\rho_w}{LWC}U_{wn}/U_\infty \tag{8}$$

其中: U_{wn} 为结冰面法向水滴速度, U_∞ 为自由来流空气速度。

2.4 边界条件

自由来流边界:

$$u = U_\infty, \quad v = 0, \quad u_w = U_\infty$$
$$v_w, \quad \alpha = LWC/\rho_w$$

紊流动能的取值为:

$$k = (0.0005 \times U_\infty^2)$$

紊流耗散的取值为:

$$\epsilon = c_\mu k^{2/3}/l, \quad l = l_m C_\mu^{1/4}$$

压力采用二阶外插得到。

固体壁面: $\alpha = 0$, 各固体壁面采用非滑移条件——速度均为零, 紊流动能和紊流耗散率在固体壁上采用两层壁面函数法来处理^[5], 压力采用法向一阶导数为零。

出口: 所有参数采用一阶导数为零。

2.5 网格生成方法^[6]

本文采用NACA 0012翼型作为结冰表面进行计算, 为了保证自由来流的边界条件, 计算区域取得足够大。由于在计算中采用了贴体坐标系, 计算域中网格划分中采用了Thompson-Middlecoff贴体网格生成技术, 网格划分如图1所示, 此网格生成技术不仅可以控制边界网格的正交性, 同时可以控制第一内节点到边界的距离, 这对于计算参数的壁面边界条件处理和壁面函数法的应用是非常有利的。

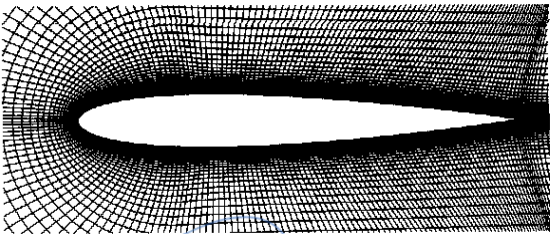


图1 翼型计算网格划分图

Fig. 1 Sketch of airfoil grid

3 数值计算

在计算时, 首先将控制方程从笛卡尔坐标系转换到贴体坐标系下, 然后用控制容积法对贴体坐标下的控制方程进行离散, 为了减少假扩散, 提高计算精度, 控制方程中对流项的离散格式采用了MU SCL 格式, MU SCL 格式的界面参数插值方法仅在构造离散格式时使用, 而在计算界面通量时采用线性插值。求解MU SCL 格式所离散的代数方程时, 对于空气控制方程, 由于扩散项的存在, 采用了“延迟修正”方法以使代数方程满足对角占优的条件; 而对水滴控制方程, 由于是纯对流

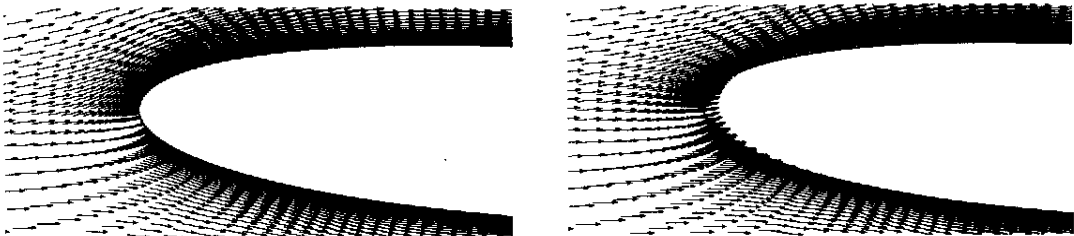


图2 翼型外空气速度(左)和水滴速度(右)分布矢量图

($AOA = 4^\circ, MVD = 16 \mu m, LWC = 1 g/m^3, Ma_\infty = 0.301, Re = 3.9 \times 10^6$)

Fig. 2 Air velocity (left) and water droplets velocity (right) over the airfoil

($AOA = 4^\circ, MVD = 16 \mu m, LWC = 1 g/m^3, Ma_\infty = 0.301, Re = 3.9 \times 10^6$)

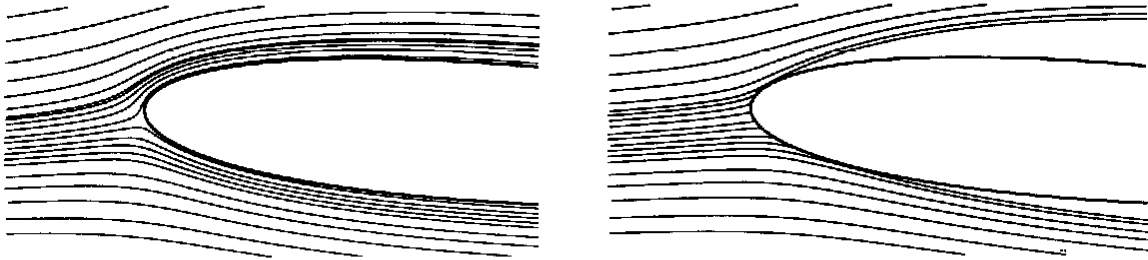


图 3 翼型外空气流线图(左)和水滴轨迹图(右)

($AOA = 4^\circ$, $MVD = 16\ \mu\text{m}$, $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$)

Fig 3 Stream lines (left) and water droplets trajectories (right)

($AOA = 4^\circ$, $MVD = 16\ \mu\text{m}$, $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$)

方程,为了加速收敛速度采用了五对角阵(PDMA)算法^[7]。压力修正采用SMPLEER算法。由于在离散控制方程时采用了同位网格,为了检测和抑制压力和速度的非耦合现象,计算压力修正方程中的源项时,采用了“动量插值”的方法^[8]。

4 计算结果分析

图 2 和图 3 所示为攻角 4 时,NACA 0012 翼型外空气、水滴的速度矢量分布和流线图。计算条件为:自由来流马赫数和雷诺数分别为: $Ma_\infty = 0.301$, $Re = 3.9 \times 10^6$,机翼的弦长 $c = 0.5334\ \text{m}$,攻角 $AOA = 4^\circ$;水滴的有效平均直径 $MVD = 16\ \mu\text{m}$,液态水含量为: $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$ 。对比图 2 的左图和右图可以看出,由于水滴的密度远大于空气的密度,在粘性阻力和自身重力以及空气浮力等合力的作用下,翼型的迎风面附近 x 方向 u 速度依然较大,使水滴直接撞击到结冰表面上。从图 3 的左图和右图可以直观地看出空气和水滴在翼型外的流动情况,由图可知除驻点区外空气的流线与翼型并无相交处,而水滴的流线在翼型迎风面

附件与翼型相交。水滴流线与翼型上下表面有相切点,在两切点范围内的区域称为翼型的结冰区,防、初冰系统是主要针对该区域进行设计的。

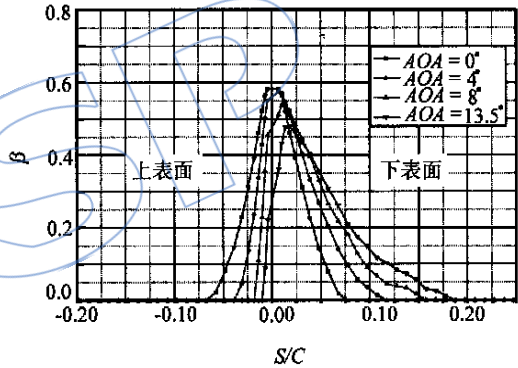


图 4 $MVD = 16\ \mu\text{m}$, $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$ 不同攻角下,翼型结冰表面水收集系数分布图

Fig 4 Effect of AOA on local collection efficiency ($MVD = 16\ \mu\text{m}$, $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$)

设计防、除冰系统不仅要知道结冰区的大小同时结冰量的大小也是同样重要的,计算结冰量

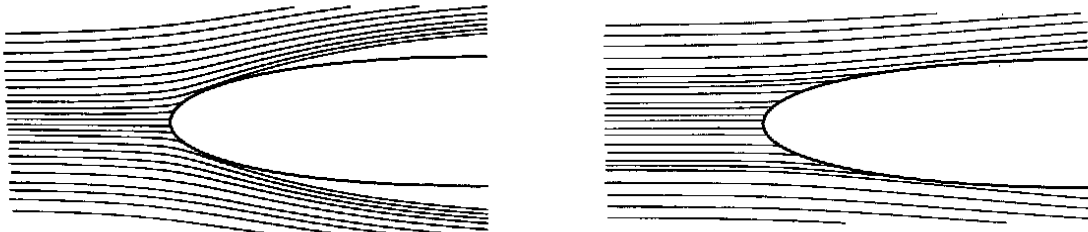


图 5 翼型外水滴轨迹图($MVD = 16\ \mu\text{m}$ (左), $MVD = 50\ \mu\text{m}$ (右), $AOA = 0^\circ$, $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$)

Fig 5 Water droplets trajectories

($MVD = 16\ \mu\text{m}$ (left), $MVD = 50\ \mu\text{m}$ (right), $AOA = 0^\circ$, $LWC = 1\ \text{g}/\text{m}^3$)

的重要参数为水收集系数。图 4 给出了不同攻角下, 结冰表面水收集系数的分布情况。由图中可以看出水收集系数从驻点区向两面逐渐减小, 随着攻角的增大, 翼型上表面的水滴撞击极限沿 y 方向减小, 而下表面的水滴撞击极限沿流线方向移动, 使得结冰区整个向下表面移动, 同时驻点区的水收集系数在降低。

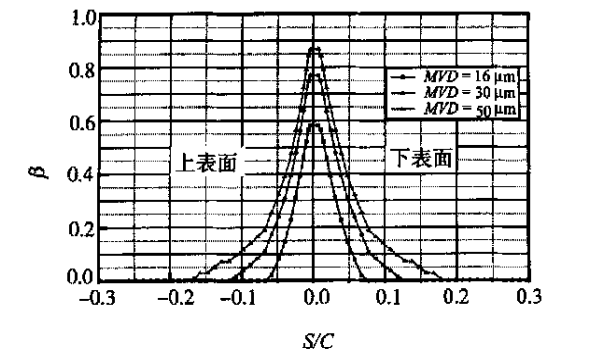


图 6 $AOA = 0^{\circ}, LWC = 11 \text{ g/m}^3$ 不同 MVD 下, 翼型结冰表面水收集系数分布图

Fig 6 Effect of MVD on local collection efficiency ($AOA = 0^{\circ}, LWC = 11 \text{ g/m}^3$)

本文还计算了水滴平均有效直径的大小对结冰的影响, 图 5 和图 6 分别给出了水滴平均有效直径 MVD 的变化对结冰区和水收集系数的影响。从图可以看出, MVD 小的水滴由于受到空气流动的影响, 在驻点区外容易发生偏离, 而 MVD 大的水滴具有较大的惯性力, 受空气流动的影响相对较小, 因此随着 MVD 的增大, 结冰表面的结冰区和水收集系数也随之增大。

5 结 论

本文采用欧拉法建立了控制方程, 并采用 $k-\epsilon$

两方程紊流模型和高阶对流项离散格式对控制方程进行了数值模拟, 通过计算以及对结果的分析得到以下结论:

- (1) 求解欧拉法建立的控制方程, 在计算结冰区和水收集系数方面更直观方便。
- (2) 水滴的有效平均直径和攻角的变化对结冰区和水收集系数影响较大。

参考文献:

[1] 裘燮纲, 韩风华合. 飞机防冰系统[M]. 北京: 航空专业教材编审组出版, 1985

[2] Durst F. Eulerian and Lagrangian Predictions of Particulate Two-Phase Flow s: A Numerical Study [J]. Appl Math. Modelling, 1984, 8: 101- 115

[3] Tran P, Brahimi M. T. Ice Accretion Prediction on Single and Multi-Element Airfoils and the Resulting Performance Degradation[R]. AIAA 97- 0178

[4] Scott J N, Hankey W. L. Navier-Stokes Solution to the Flowfield Over Ice Accretion Shapes[J]. J. Aircraft, 1988, 25: 710- 716

[5] Douglas L. Sondak Application of Wall Functions to Generalized Nonorthogonal Curvilinear Coordinate systems [J]. AIAA Journal, 1995, 33: 33- 41

[6] White J A. Elliptic Grid Generation with Orthogonality and Spacing Control on an Arbitrary Number of Boundaries [R]. AIAA 90- 1568

[7] Darwish M S, Moukalled F. The Normalized Weighting Factor Method: A Novel Technique for Accelerating the Convergence of High-Resolution Convective Schemes[J]. Numerical Heat Transfer, Part B. 1996, 30: 217- 237.

[8] Lien F S, Leschziner M A. A General Non-Orthogonal Collocated Finite Volume Algorithm for Turbulent Flow at All Speeds Incorporating Second-Moment Turbulence-Transport Closure, Part 1: Computational Implementation [J]. Comput. Methods Appl. Engrg., 1994, 114: 123- 148