

# 基于欧拉方法的旋翼翼型结冰数值模拟及参数影响

张威<sup>1</sup> 林永峰<sup>2</sup> 陈平剑<sup>3</sup>

(1. 中国直升机设计研究所总体气动室, 景德镇, 333001;

2. 中国直升机设计研究所直升机旋翼动力学重点实验室, 景德镇, 333001;

3. 中国直升机设计研究所技术发展部, 景德镇, 333001)

**摘要:**从研究二维翼型结冰问题入手, 基于水滴流场的概念, 采用基于气液两相流的欧拉方法求解水滴流场, 得到水滴收集特性, 再结合热力学模型数值模拟旋翼翼型结冰过程。通过计算结果和冰风洞试验数据的比较, 验证了该方法正确有效。同时研究了气象参数对结冰的影响。基于本文建立的方法, 计算分析了飞行速度、平均水滴直径、水滴浓度、温度等不同参数对水滴收集效率、冰型、结冰量、结冰范围的影响, 深入地探讨了翼型结冰机理和结冰形成条件, 得出气象参数影响特征。

**关键词:**欧拉方法; 结冰; 水滴收集; 冰型; 参数影响

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)03-0375-06

## Numerical Simulation of Ice Accretion and Parameter Effects Based on Eulerian Droplet Model

Zhang Wei<sup>1</sup>, Lin Yongfeng<sup>2</sup>, Chen Pingjian<sup>3</sup>

(1. General and Aerodynamic Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China;

2. Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics Laboratory, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China;

3. Technology Development Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China)

**Abstract:** Base on the water droplet flow field conception, the Eulerian two-phase flow model for the air flow containing water droplets is employed to calculate the water droplet collection efficiency. Then the iced progress is simulated with the Gresho thermodynamics model. The calculation result agrees well with the ice wind tunnel experimental data available, indicating that the method is effective. The weather parameters, such as velocity, temperature, MVD, and LWC, are important effect factors on the water droplet collection efficiency, ice accretion, and ice shape. However there is still no comprehensive study on the subject in the open literature. In this paper. The icing progresses and icing conditions are discussed thoroughly by calculating and analyzing the parameters effects, and some useful conclusions about the effect are obtained.

**Key words:** Eulerian method; ice accretion; water droplet collection; ice shape; parameter effects

在直升机的飞行高度范围内, 水滴含量较大, 因此直升机在执行任务期间遭遇结冰而发生危险的概率就比较高。尤其当直升机在云中或降雨区域

飞行时, 机体的突出部位遭遇结冰问题更加突出, 如进气道、旋翼、尾桨、空速管、驾驶舱风挡等。结冰不仅破坏直升机的气动特性, 还会增加直升机的质

量,随之导致直升机飞行阻力增加,拉力下降,操纵性、稳定性下降,严重影响飞行安全。目前对于进气道、驾驶舱风挡等部位的防/除冰已经有比较成熟的技术措施,但对于旋翼和尾桨的结冰问题还研究较少,因此对这方面的研究就显得尤为必要。

对于结冰问题的研究,目前主要通过3种途径进行:飞行测试、风洞试验和数值模拟<sup>[1]</sup>。相对于飞行测试和风洞试验而言,数值模拟具有投资少、模拟范围广等特点。

数值模拟翼型结冰问题在国外开展得较早,并且已经形成了较为成熟的商业软件,如美国的LEWICE、加拿大的FENSAP-ICE等。这两种软件代表了两种典型的方法:LEWICE采用拉格朗日法计算水滴轨迹;FENSAP-ICE则采用基于欧拉方法的气液两相流模型来计算水滴流场。国内相关研究开展较晚,且也是沿着两条路发展:拉格朗日法<sup>[2-4]</sup>和欧拉气液两相流法<sup>[5-6]</sup>。

本文从研究旋翼二维翼型结冰问题入手,基于水滴流场的概念,建立一种欧拉气液两相流水滴撞击模型,求解水滴流场,获得水滴收集特性,再结合热力学模型数值模拟旋翼翼型结冰过程。

气象条件对于翼型结冰有着决定性影响,而国内学者还没有系统开展相关研究。影响直升机结冰问题的气象因素有很多,例如温度、水滴浓度(Liquid water content, LWC)、飞行速度、云层类型、平均水滴直径(Median volume diameter, MVD)等等。本文重点针对温度、LWC、飞行速度、MVD等参数对直升机旋翼翼型的结冰过程进行数值模拟计算和影响分析。

## 1 计算网格

计算网格生成是计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)一个重要组成部分,是促进CFD工程实用化的一个重要因素。网格品质的好坏直接影响数值解和气动数据的计算精度,而且这种影响在许多情况下甚至是决定性的,因此,计算网格生成受到世界各国CFD工作者和工业部门的重视。为了精确模拟翼型表面附面层流动细节,本文采用结构化网格。网格第一层厚度为 $1 \times 10^{-6}$  m(基于弦长单位化后的厚度)。环绕翼型使用C型网格拓扑结构,计算网格及翼型前缘放大图如图1所示。为了更好地计算翼型的空气动力学特性和更好地描述结冰后翼型的前缘外形,所以在初始网格生成的时候,对翼型的前缘进行了特别的加密。

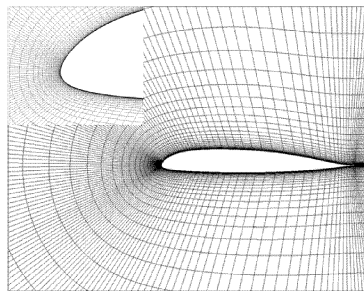


图1 翼型计算网格及前缘放大图

## 2 基于欧拉方法的气液两相流求解

本文用数值求解N-S方程的方法进行流场求解。湍流模型使用Spalart-Allmaras(S-A)模型。S-A模型是一方程湍流模型,它具有比零方程湍流模型更好的计算精度,特别是当流场中出现激波或流动分离的时候;它还具有比两方程模型更快的计算速度。

翼型表面水滴收集特性对于模拟翼型的结冰过程至关重要。目前主要通过基于拉格朗日法<sup>[7-10]</sup>和欧拉两相流法<sup>[5-6,11]</sup>来获得水滴收集特性。拉格朗日法通过计算水滴运动方程跟踪流场中每一个水滴的运动轨迹,得到翼型表面的水滴收集特性,但其对多段翼型等复杂外型绕流,程序处理很麻烦,并且较难使其具有良好的通用性;而对于三维结冰计算,对大量水滴分别进行轨迹与物面边界碰撞点计算,需要消耗大量计算机资源。本文采用欧拉两相流法,引入水滴流场的概念,通过水滴流场计算,获得翼型表面水滴收集特性,其优点在于可利用同一套网格分别计算空气和过冷水滴控制方程,由水滴流场的计算结果得到翼型表面的水滴收集特性,提高了计算效率,尤其对于复杂外形,可大大节省机时。对气液两相流的流场特性做出如下假设<sup>[6,11]</sup>:

- (1)水滴被空气输运,但是水滴有自己的惯性和质量;
- (2)空气对水滴的运动产生影响,但是水滴因为体积和浓度都很小,从而对气流不产生影响;
- (3)水滴为球形且在运动过程中不会发生变形和分裂;
- (4)水滴在运动过程中不碰撞、不合并;
- (5)水滴在运动过程中和周围空气不发生质量、热交换;
- (6)水滴上的作用力仅有空气粘性阻力、重力和空气浮力。

水滴流场的控制方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}_d) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d(\mathbf{u}_d)}{dt} = \frac{C_D Re_d}{24K} (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_d) + \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_d}\right) \frac{\mathbf{g}}{Fr^2} = 0 \quad (2)$$

式中:  $Re_d = \frac{\rho_a d \|\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_d\|}{\mu_a}$ ;  $K = \frac{\rho_a d^2}{18 \mu_a}$ 。

描述水滴撞击的一个重要参数就是水滴收集效率。首先定义水滴收集效率

$$\beta = -\frac{\alpha \rho (\mathbf{u}_d \cdot \mathbf{n})}{\alpha_\infty \rho \|\mathbf{u}_{d,\infty}\|} \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为水滴收集效率;  $\alpha$  为当地水滴的体积因子;  $\alpha_\infty$  为无穷远处水滴的体积因子;  $\rho$  为水滴密度;  $\mathbf{u}_d$  表示当地水滴速度;  $\mathbf{n}$  表示物面法向,  $\mathbf{u}_{d,\infty}$  表示无穷远处未受扰动流场的水滴速度。

### 3 结冰数值模拟算例验证

首先选择一个有试验结果的状态进行结冰过程数值模拟计算,通过对比计算结果和试验结果,验证本文计算方法的正确性。

#### 3.1 流场计算

本文选择了某旋翼翼型来进行气动特性数值模拟。为了和试验结果比较,计算状态和试验状态相同,即:  $v = 100 \text{ m/s}$ ,  $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $LWC = 0.3 \text{ g/m}^3$ ,  $MVD = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $c = 0.135 \text{ m}$ ,  $\alpha = 4^\circ$ 。通过数值求解N-S方程得到整个流场特性,其中包括了翼型表面热通量分布和剪应力分布,因为这些在计算水滴结冰时是至关重要的。

#### 3.2 水滴撞击

通过求解基于欧拉方法的水滴撞击模型,得到水滴流场,图2所示的是LWC分布图。图中A区域是水滴流场几乎未受到翼型干扰,水滴浓度和自由远场相同的区域;B、C两个区域是水滴浓度比自由远场中浓度大的区域;D区域是水滴因翼型干扰而无法到达的区域。水滴收集效率如图3所示,很显然在翼型的前缘驻点处收集效率最高。

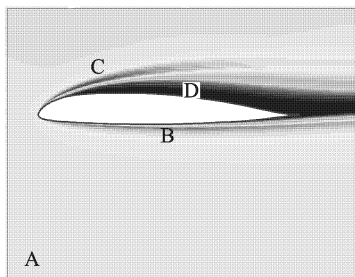


图2 LWC云图

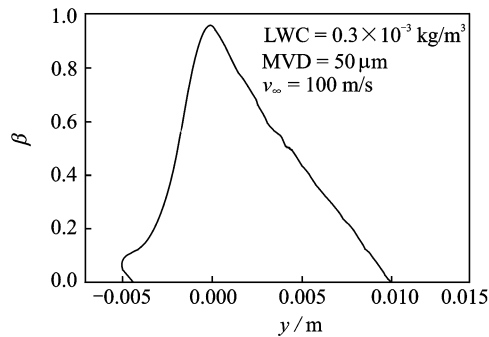


图3 水滴收集效率

### 3.3 结冰模拟

#### 3.3.1 结冰类型

翼型结冰可以分为霜冰、光冰和混合冰3种主要的类型。

霜冰是一种表面粗糙、乳白色的冰。大部分的霜冰可以通过除冰系统除掉,或通过防冰系统进行预防。

光冰是一种表面光滑的、紧贴物体表面、坚固的冰,而且随着结冰的进一步发展,它可以形成羊角状。这种冰除去很困难,且对翼型的气动特性破坏非常严重。

混合冰是一种光冰和霜冰的混合物。

本文所有计算状态,结冰类型不做人工限制,而是在计算模型中加入了Gresho热力学模型,通过热力学平衡计算,自行判定撞击水滴是否结冰以及结冰类型。

#### 3.3.2 计算结果和试验结果比较

结冰计算的结果(图4)显示上翼面结冰范围是从前缘到18.4 mm处,下表面结冰范围是从前缘到92 mm左右。试验结果(图5)显示,结冰沿翼型前缘向流向延伸,翼型上表面从前缘至17 mm处结冰明显,17~21 mm处也有少量稀薄的结冰,下表面结冰范围在从前缘到87 mm左右,结冰呈乳白色冰状。从数据对比来看,计算值和试验值较为吻合;从

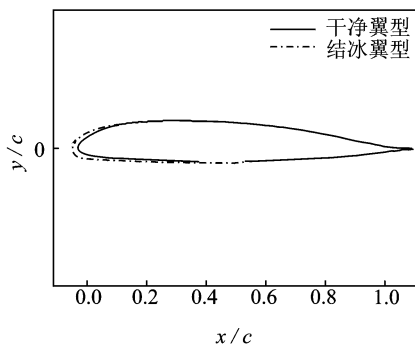


图4 结冰计算结果

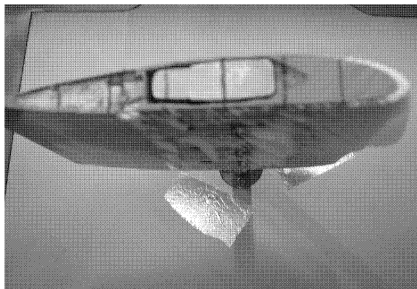


图5 试验所得冰型图

图形对比来看,结冰的形状也非常相似。通过该算例对比分析,很好地验证了本文方法的准确性。

## 4 不同参数对水滴收集效率的影响

为了研究不同气象参数对冰型和结冰量的影响,首先要研究气象参数对水滴收集效率的影响。

### 4.1 速度对水滴收集效率的影响

图6所示的分别是MVD=20 μm时不同马赫数对水滴收集效率的影响。从图中可以看出,速度越大,水滴的撞击范围和当地的水滴收集效率就越大。这是因为速度越大,水滴的动量就越大,改变运动轨迹所需的时间就越长。但是速度越大,水滴从受扰动开始到和翼型表面相撞的时间就越短,也就是说有更多的水滴在运动轨迹还没有做出太大改变之前就与翼型表面碰撞了。

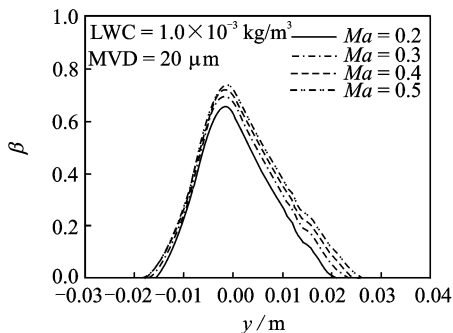


图6 速度对水滴收集效率的影响

### 4.2 MVD对水滴收集效率的影响

在速度和LWC相同的情况下,分别选择不同的MVD进行了计算,计算结果如图7所示。从图中可以看到,随着MVD的增大,水滴收集效率无论是大小还是覆盖范围都在增加,但是增加的幅度在逐渐减小。这是因为当MVD较小时,水滴的质量很小,惯性较小,当气流受到翼型的干扰时,水滴中的很大一部分也随着气流一起改变了运动轨迹,顺着气流飞走了,而不能撞击到翼型上<sup>[6,12]</sup>。随着MVD的增大,水滴惯性增大,就有更多的水滴可

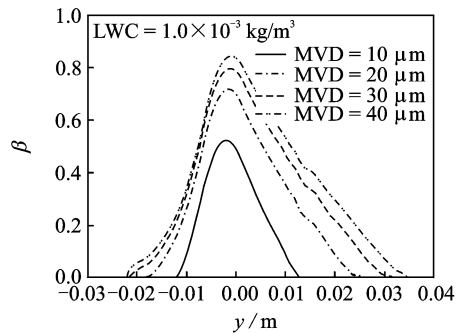


图7 MVD对水滴收集效率的影响

以撞击到翼型上,水滴收集的量和范围也就不断增大。而随着MVD的增加,收集效率逐渐趋于饱和,这时水滴惯性对于收集效率增量的影响就越小。

### 4.3 LWC对水滴收集效率的影响

从图8中可以看出,LWC对水滴收集效率几乎没有影响,这里主要从以下几个方面进行分析:从方程(3)水滴收集效率的定义来看,基于本文第2节的第2条假设,水滴对空气流场不产生影响,所以在速度和MVD一定的情况下,收集效率只和体积因子比值 $\alpha/\alpha_\infty$ 相关。因为本文方法是基于第2节的6条假设,水滴在和翼型相撞之前相互之间没有干扰,所以随着LWC的变化,当地水滴体积因子 $\alpha$ 随 $\alpha_\infty$ 的变化规律不变,即 $\alpha/\alpha_\infty$ 是定值,也就是说收集效率和LWC无关。

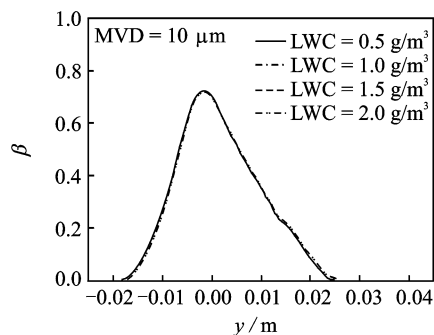


图8 LWC对水滴收集效率的影响

## 5 不同参数对冰型的影响

### 5.1 MVD对冰型的影响

为了研究MVD对冰型的影响,本文在速度、温度、LWC相同的情况下,分别计算了MVD=10, 20, 30, 40 μm四种状态下的结冰情况,结果如图9所示。可以看出,随着MVD的增加,结冰量和结冰覆盖的范围都在增加。这和水滴收集效率随MVD的变化趋势是一样的,可见水滴收集效率对结冰有

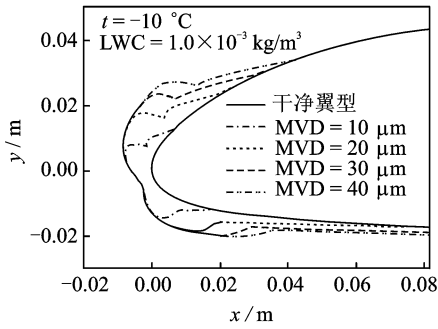


图9 MVD对冰型的影响

着重要的影响。同时可以发现各种MVD的情况下,在翼型的前缘冰型曲线几乎是重合的,并没有随水滴收集效率的增加而有明显增加。这是因为结冰过程不仅和收集效率有关,还和热力学以及表面摩擦力等因素有关。也就是说在某一时刻,撞击的水滴只有部分能够结冰,在达到热平衡后,其他水滴则形成水膜向翼型后缘方向流去,在流动的过程中不断地形成结冰。

## 5.2 温度对结冰的影响

很容易理解,温度是影响结冰量的重要因素。从图10中可以看出,在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,翼型前缘只结了薄薄的一层冰,而且厚度比较均匀。这是因为此时温度相对较高,很大一部分撞击到翼面上的水滴并没有马上结冰,而是形成水膜向翼型后缘方向流去。在流动的过程中有的液态水结冰了,而更多的液态水最终也没有形成固态的冰,随着气流飞走了。 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冰型是典型的羊角状光冰; $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰型是典型的混合冰; $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冰型是典型的顿头型霜冰。飞行试验和冰风洞试验结果表明,不同冰型对翼型的气动特性的破坏程度不同,其中羊角状冰是最为可怕的冰,不仅严重破坏翼型的气动特性,而且非常坚固,很难除去。

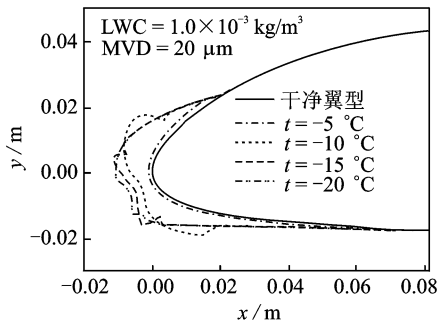


图10 温度对冰型的影响

## 5.3 LWC对结冰的影响

选择在 $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $MVD = 20\text{ }\mu\text{m}$ ,  $Ma = 0.4$

时,  $LWC = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{ g/m}^3$  四种状态计算比较LWC对结冰的影响。LWC虽然对水滴收集效率几乎没有任何影响,但是对结冰量却会产生巨大影响。理论上,在结冰量达到饱和之前,LWC越大,提供的可以用来结冰的水滴就会越多,结冰量就会越大(图11)。同时从图11中可以进一步看出,这些多出的结冰量主要是向后堆积且向羊角状发展,这也是要满足热力学平衡条件造成的。

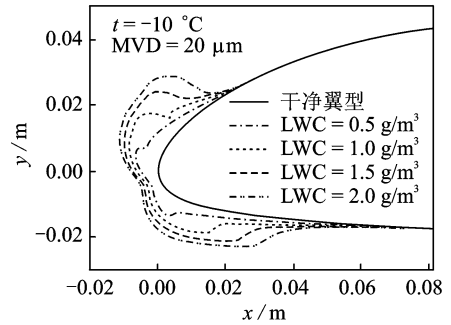


图11 LWC对冰型的影响

## 5.4 速度对结冰的影响

图12所示的是在 $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $MVD = 20\text{ }\mu\text{m}$ ,  $LWC = 1.0\text{ g/m}^3$ 时,  $Ma = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  四种状态的冰型。从图中可以看出,速度对于冰型的影响更为复杂。

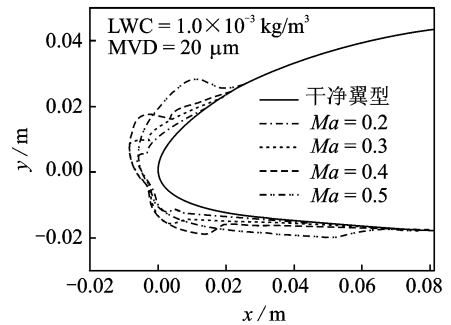


图12 速度对冰型的影响

首先,速度通过对水滴收集效率的影响来影响结冰量和结冰覆盖范围。 $Ma = 0.3, 0.4, 0.5$  均比 $Ma = 0.2$ 时结冰量和结冰覆盖范围大,主要就是水滴收集效率的影响。

其次,速度通过影响水滴在撞击翼面后的流动速度来影响冰型, $Ma = 0.4$ 和 $Ma = 0.3$ 时翼型前缘的冰型曲线是重合的,而没有随水滴收集效率的增大而增大,就是因为随着速度的增加,更多的水滴速度很大,还没来得及结冰就随气流向后方流动,从而使更多的冰堆积在后方。

最后,速度通过气动热来影响冰型,在 $Ma =$

0.5时,翼型前缘的结冰量没有因为水滴收集效率的增加而增加,相反却有所减少,就是因为气动热的原因,使得此处更早地达到了热平衡,水滴更多地向后缘流动。

## 6 结束语

本文采用基于气液两相流的欧拉方法建立了一种旋翼翼型结冰数值模拟方法,计算了某翼型的结冰过程。计算结果和试验数据有良好的一致性,表明本文的结冰数值模拟方法正确有效。通过应用该方法计算分析不同气象条件参数对翼型水滴收集效率和结冰类型的影响,更加深入地探讨了翼型结冰机理和结冰形成条件,得出参数影响特性。这些都具有重要意义。本文的计算分析结果对于结冰问题的研究以及进一步开展旋翼三维桨叶结冰数值模拟和直升机旋翼系统防/除冰设计等都具有重要的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 李国知,胡利,张瑞民,等. 直升机旋翼桨叶翼型积冰的数值模拟[J]. 直升机技术,2008(3):78-81.
- [2] 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.
- [3] 桑为民,蒋胜矩,李凤蔚. 翼型冰增长和结冰影响的数

值模拟研究[J]. 应用力学学报,2008,25(3):371-374.

- [4] 易贤,朱国林,王开春,等. 翼型结冰的数值模拟[J]. 空气动力学学报,2002,20(4):428-433.
- [5] 陈维建,张大林. 溜状冰结冰过程的数值模拟[J]. 航空动力学报,2005,20(3):472-476.
- [6] 周志宏,李凤蔚,李广宁. 基于两相流欧拉方法的翼型结冰数值模拟[J]. 西北工业大学学报,2010,28(1):138-142.
- [7] Snellen M, Boelens O J, Hoeijmakers H W M. A computational method for numerically simulating ice accretion[R]. AIAA-1997-2206, 1997.
- [8] Liu Jing, Feng Wenliang, Li Jie. N-S based ice accretion prediction method with deformed grid technique[R]. AIAA-2008-7064, 2008.
- [9] Mingione G, Brandi V. A 3D ice accretion simulation code[R]. AIAA-1999-0247, 1999.
- [10] 冯文梁,李杰,张威. 基于变形网格技术的翼型结冰数值模拟研究[J]. 西北工业大学学报,2008,26(5):250-255.
- [11] Bourgaug Y, Habashi W G. An Eulerian approach to supercooled droplets impingement calculations [R]. AIAA-1997-0176, 1997.
- [12] Tsao Jen Ching, Anderson D N. Additional study of water droplet median volume diameter (MVD) effects on ice shapes[R]. AIAA-2004-0413, 2004.