

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.04.047

螺旋桨三维积冰对气动特性影响的数值研究

栗枢^a,曹广州^b

(南京航空航天大学 a. 能源与动力学院; b. 无人机研究院,江苏 南京 210016)

摘要:为提高中小型无人机在螺旋桨结冰条件下的飞行能力,降低积冰对气动性能的危害,对比分析了其在不同速度采用考虑离心力的旋转部件欧拉-欧拉法两相流模型及旋转表面薄水膜流动三维积冰模型,对螺旋桨表面积冰进行三维数值模拟研究。对2714型螺旋桨进行了速度-转速匹配,对比分析了不同速度-转速匹配下对螺旋桨表面积冰的影响,以及螺旋桨积冰的流场分布情况和结冰前后螺旋桨设计点后方的速度变化,并引申到螺旋桨推力的变化。研究表明:随着速度-转速的增大,积冰量和冰层厚度增大,积冰轮廓向下游发展成角状冰;结冰后螺旋桨表面附近流场变得更加紊乱,尤其形成角状冰后出现明显的回涡流。结冰后螺旋桨设计点后方气流速度减小,推力随之下降,气动性能受到影响。

关键词:螺旋桨;三维积冰;气动特性;速度匹配;设计点

中图分类号:V231.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)04-0178-05

Numerical Study of Effect of Propeller 3D Ice Accretion on Aerodynamic Characteristics

LI Shu^a, CAO Guangzhou^b

(a.College of Energy and Power Engineering;b. Research Institute of Unmanned Aircraft,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the flying ability of small and medium sized UAV with the ice accretion on propeller, and to reduce the damage to its flying performance, the equation sets were established based on the comparison and analysis of the double phase flow of air and super-cooled water droplets adapted to the Eulerian multi-phase flow model around accretion of the surface of propeller in different flying-rotating speed. Three dimensional numerical simulation on ice accreted propeller was studied. Different speed and cruising point matching on 2714-type propeller was conducted and its effect on the ice accretion on propeller was compared and analyzed. The velocity of bottom region of the design point of propeller before and after ice accretion was studied, with the change of lift force being observed. The results show that as the speed and cruising point increase, the ice accretion gets bigger and the ice becomes thicker, the ice outline on the propeller grows along the downstream and eventually takes shape of tangular ice. Upon ice accretion, the flow field around the propeller becomes more chaotic, and the backflow eddy flows out as tangular ice is shaped. When ice accretes, the velocity of the design point decreases, the thrust weakens, and the aerodynamic performance suffers damage accordingly.

Keywords: propeller; three-dimensional ice accretion; aerodynamic performance; speed matching; design point

0 引言

飞机在空中飞行过程中会穿过大量云层,与过冷水滴相遇,短暂而迅速的冲击就会使得过冷水滴迅速凝结成冰,依附在飞机表面的迎风部件上,飞机机翼、直升机旋翼^[1]、无人机螺旋桨、挡风玻璃、发动机进口、测温及测压探头等,产生了飞机表面的结冰现象^[2-3]。积冰类型常见的有明冰^[4-5]、霜冰和混合冰三种。当温度较高,水滴含量较大的过冷水滴撞击到飞机的积冰部件表面时,只有一部分过冷水滴冻结成冰,即所谓的明冰。若未对飞机设置防冰系统,下游区域会形成对飞行性能影响更为严重的冰脊^[6]。

无人机分为固定翼无人机和多旋翼无人机,拥有三个

以上旋翼的无人机称为多旋翼无人机,而军用无人机大多是固定翼无人机。飞行过程中,无人机螺旋桨、摄像头等部位的积冰不可避免,这些积冰影响着飞机的飞行性能和飞行安全,甚至可导致飞机坠毁^[7]。

普通有人机结冰会导致飞机升力减小、阻力增大、易失速、发动机功率下降、视线不清、探测数据失真等问题的发生,影响飞机性能和安全^[8]。例如直升机旋翼表面的积冰会导致转矩的急剧增加^[9-13],使得飞机的升力减小,阻力增大,过大的转矩甚至会超过发动机所能够承受的极限,从而使得飞行变得十分危险。而对于速度较慢的中小型无人机,其迎风部件如螺旋桨、机翼、摄像头等更易结冰,加之其自身的气动稳定性较差且动力有限,因此更易受影响。更严重的是,由于旋转带来的离心力作用,螺旋桨表面的冰相比于固定翼更加容易脱落^[14]。对于螺旋桨

第一作者简介:栗枢(1993—),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向为传热与传质。

在飞机最前面的前拉式螺旋桨,脱落的冰块必然会撞击到后方的其他部件,形成飞机的二次损伤,从而造成非常严重的飞行事故^[15]。

本文考虑到螺旋桨翼型的三维扭转特性,开发了适合螺旋桨三维积冰与气动特性计算的结构化-非结构化的混合网格划分方法。并通过CFX流场计算,找到几组最佳速度-转速匹配,使得考虑到飞行来流和旋转来流下更贴合螺旋桨气动外形。此外考虑到旋转条件下水膜的甩脱,发展适用于考虑飞行来流的旋转条件下撞击特性和三维积冰模型的数学模型及其计算方法,利用Fortran开发了相应的积冰模拟程序,并进行了不同速度/转速下的积冰数值模拟和对比分析。最后,给出覆冰螺旋桨的流场分布以及积冰前后典型气流状态点的速度变化,并进行了简单的气动性能分析。

1 螺旋桨转速与飞行速度的匹配

1.1 计算模型、网格划分与边界条件介绍

本文选取2714型螺旋桨进行三维积冰模拟,如图1所示,桨的直径为0.6912 m。由于机身遮挡,螺旋桨转轴附近受流场影响较弱,故作简化处理,去除螺旋桨转轴附近的桨叶部分。由于桨尖效率低且结构复杂,计算模型半径缩减至为0.31 m。

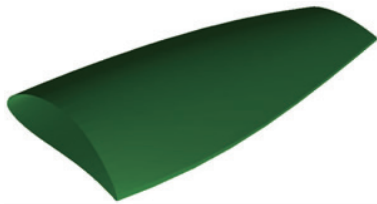


图1 螺旋桨计算模型

1.2 飞行速度的选择

飞机在飞行过程中遇到的来流速度会影响到螺旋桨的气动性能和积冰结果,故十分重要。而作为典型的旋转部件,无人机螺旋桨在飞行过程中同时受到飞行来流和旋转来流的作用,二者的气流流动方向不同,物理上视作形成了一个合速度影响着螺旋桨表面。而对于来流速度、旋转部件转速的研究,无论是发动机整流罩还是直升机的旋翼,都是相互独立的研究,但实际的无人机螺旋桨表面所处的流场应是在飞行来流基础上,加上螺旋桨旋转所产生的旋转来流这二者的合流动。由于方向的不同,不同的飞行速度与螺旋桨转速的匹配会造成合速度的方向有所不同,选择合理的速度-转速匹配,可以使气流较好地贴合在螺旋桨表面流动而不发生分离。

中小型固定翼无人机的螺旋桨转速一般在2 500 r/min~7 500 r/min范围内,根据飞行需求的不同,相应的转速有所不同。下面以常见的转速3 900 r/min、5 100 r/min、6 600 r/min为研究对象,与飞行来流相结合,确定适合这3个转速下的飞行速度,形成最佳速度-转速匹配,为后面的积冰计算分析提供基础。

1) 螺旋桨转速为3 900 r/min的对应飞行速度匹配

在螺旋桨转速为3 900 r/min这一转速较低的条件,其对应的飞行速度也偏低。中小型无人机的飞行速度一般在20 m/s~70 m/s左右,针对3 900 r/min的转速,分别取飞行速度为20 m/s、30 m/s、40 m/s进行流场计算,所得到的 $r/R=0.7$ 截面处,不同飞行速度的流场中气流流动分布分别如图2、图3、图4所示。

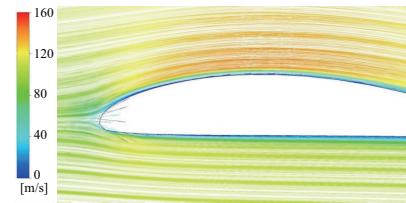


图2 $r/R=0.7$ 截面处,转速3 900 r/min、飞行速度20 m/s的流场分布

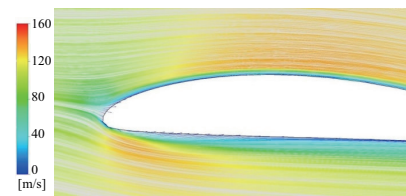


图3 $r/R=0.7$ 截面处,转速3 900 r/min、飞行速度30 m/s的流场分布

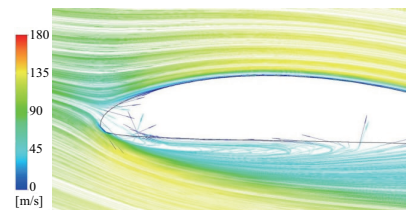


图4 $r/R=0.7$ 截面处,转速3 900 r/min、飞行速度40 m/s的流场分布

由图2可知,在飞行速度为20 m/s的条件下,来流基本上是撞击到螺旋桨前缘的驻点位置才分开,而压力面与吸力面的气流贴合度较好,充分迎合了螺旋桨的气动外形。由图3可知,当飞行速度增加到30 m/s时,气流分开的位置逐渐由驻点位置上移,使得吸力面前段小部分区域的气流流动轨迹较螺旋桨表面有所凸起,有小涡的存在,没有达到贴合的效果,略微影响螺旋桨的气动特性。而当飞行速度增加到40 m/s时,由图4可知,气流分开的位置继续向螺旋桨压力面下游偏移,使得吸力面气流流动较为混乱,有较大的涡出现,吸力面大部分区域都受到了影响,严重影响螺旋桨的气动特性。由此认为在螺旋桨转速为3 900 r/min下,飞行速度为20 m/s为最佳匹配。

2) 螺旋桨转速为5 100 r/min的对应飞行速度匹配

在螺旋桨转速为5 100 r/min这一中转速的条件下,其对应的飞行速度也有所提高。针对5 100 r/min的转速,分别取飞行速度为30 m/s、40 m/s、50 m/s进行流场计算,所得到的 $r/R=0.7$ 截面上不同飞行速度的流场中气流

流动分布分别如图 5、图 6、图 7 所示。

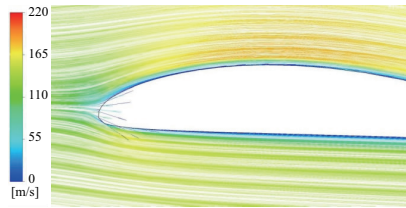


图 5 $r/R=0.7$ 截面处, 转速 5 100 r/min、飞行速度 30 m/s 的流场分布

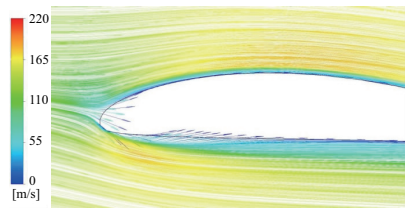


图 6 $r/R=0.7$ 截面处, 转速 5 100 r/min、飞行速度 40 m/s 的流场分布

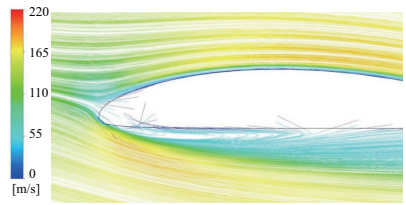


图 7 $r/R=0.7$ 截面处, 转速 5 100 r/min、飞行速度 50 m/s 的流场分布

由图 5 可知, 在飞行速度为 30 m/s 的条件下, 来流基本上都是撞击到螺旋桨前缘的驻点位置才分开, 而压力面与吸力面的气流贴合度较好, 充分迎合了螺旋桨的气动外形。由图 6 可知, 当飞行速度增加到 40 m/s 时, 气流分开的位置逐渐由驻点位置上移, 使得吸力面前段小部分区域的气流流动轨迹较螺旋桨表面有所凸起, 有小涡的存在, 没有达到贴合的效果, 略微影响螺旋桨的气动特性。由图 7 可知, 当飞行速度增加到 50 m/s 时, 气流分开的位置继续向螺旋桨压力面下游偏移, 使得吸力面气流流动较为混乱, 有较大的涡出现, 吸力面大部分区域都受到了影响, 严重影响螺旋桨的气动特性。由此认为, 螺旋桨转速为 5 100 r/min 下, 飞行速度为 30 m/s 为最佳匹配。

3) 螺旋桨转速为 6 600 r/min 的对应飞行速度匹配

在螺旋桨转速达到 6 000 r/min 以上时, 为高转速条件。针对 6 600 r/min 的转速, 分别取飞行速度为 40 m/s、50 m/s、60 m/s 进行流场计算, 所得到的 $r/R=0.7$ 截面上不同飞行速度的流场中气流流动分布分别如图 8、图 9、图 10 所示。

由图 8 可知, 在飞行速度为 40 m/s 的条件下, 来流基本上是撞击到螺旋桨前缘的驻点位置才分开, 而压力面与吸力面的气流贴合度较好并充分迎合了螺旋桨的气动外形。由图 9 可知, 当飞行速度增加到 50 m/s 时, 气流分开的位置逐渐由驻点位置上移, 使得吸力面前段小部分区域

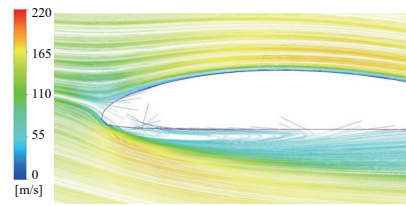


图 8 $r/R=0.7$ 截面处, 转速 6 600 r/min、飞行速度 40 m/s 的流场分布

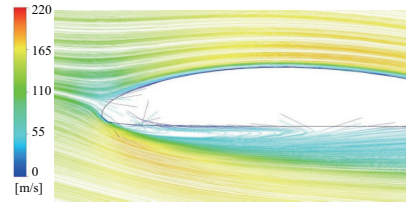


图 9 $r/R=0.7$ 截面处, 转速 6 600 r/min、飞行速度 50 m/s 的流场分布

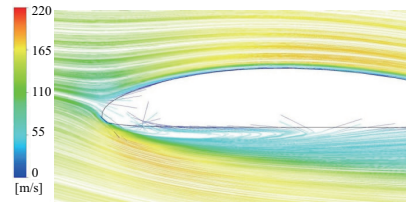


图 10 $r/R=0.7$ 截面处, 转速 6 600 r/min、飞行速度 60 m/s 的流场分布

的气流流动轨迹较螺旋桨表面有所凸起, 有小涡的存在, 没有达到贴合的效果, 略微影响螺旋桨的气动特性。由图 10 可知, 当飞行速度增加到 60 m/s 时, 气流分开的位置继续向螺旋桨压力面下游偏移, 使得吸力面气流流动较为混乱, 有较大的涡出现, 吸力面大部分区域都受到了影响, 严重影响螺旋桨的气动特性。由此认为, 在螺旋桨转速为 6 600 r/min 下, 飞行速度为 40 m/s 为最佳匹配。

2 最佳速度-转速匹配的积冰影响

1) 计算模型、网格划分与边界条件介绍

计算模型仍采用 2714 型螺旋桨见上节, 改变速度-转速匹配值, 其他参数不变, 计算条件见表 1。

表 1 2714 型螺旋桨的计算条件

截面位置 r/R	转速 $n/(r/min)$	环境温度 $T_{\infty}/^{\circ}C$	水滴含量 $L_{WC}/(g/n)$	水滴直径 M_{VD}/m	积冰时间 t/s
0.7	5 100	-10	2.0	35	180

2) 不同速度-转速匹配对螺旋桨积冰的影响

根据计算可知, 飞行速度 20 m/s、螺旋桨转速 3 900 r/min; 飞行速度 30 m/s、螺旋桨转速 5 100 r/min; 飞行速度 50 m/s、螺旋桨转速 6 600 r/min 分别得到了 3 组不同的速度-转速匹配组合。不同速度-转速匹配下 $r/R=0.7$ 的局部水收集系数分布情况如图 11 所示。由图

可知,随着速度-转速合速度的增大,局部水收集系数有所增加。这是因为随着飞行速度和螺旋桨转速的增大,来流水滴撞击速度增大,水滴惯性也随之增大,水滴就更容易撞击到螺旋桨表面,从而形成水膜,其局部水收集系数也相应增大。

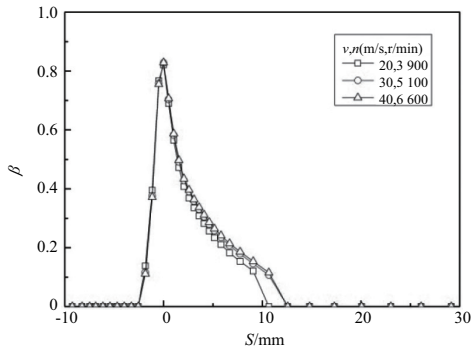


图 11 不同速度-转速下的局部水收集系数分布

不同速度-转速匹配下 $r/R=0.7$ 截面位置冰层厚度分布情况如图 12 所示。由图可见,随着飞行速度和螺旋桨转速的增大,相同截面上的冰形高度越大,冰形的覆盖范围也越大。这是因为当飞行速度和螺旋桨转速增大时,来流水滴速度越大,水滴的惯性也越大,空气相对于水滴运动的影响较小,水滴就更容易撞击到螺旋桨表面,从而造成更大的冰层厚度。

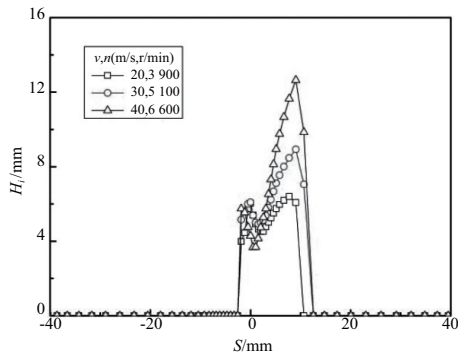


图 12 不同速度-转速下的冰层厚度分布

不同速度-转速匹配下 $r/R=0.7$ 截面的最终冰型轮廓图如图 13 所示。由图可知,随着速度/转速合速度的增大,水滴逐渐被带到下游,结冰位置更靠后,逐渐形成角状冰。

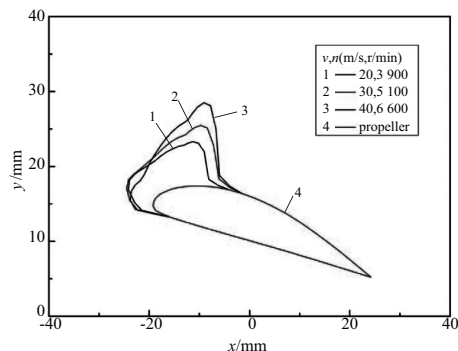


图 13 不同速度-转速下的冰型轮廓图

3 覆冰螺旋桨气动性能分析

1) 模型介绍

本章计算采用的物理模型、计算域与前面小节的螺旋桨算例中的相同,但内部结构化网格的螺旋桨模型有所改变。由于之前的螺旋桨积冰计算,使得螺旋桨表面结冰,将所得冰的几何模型导出,与原有的螺旋桨模型合并,视为积冰条件下新的冰-桨几何结构,更新了计算域边界,形成了以冰-桨表面为边界的新计算域。这种处理办法在前缘点、线及整个冰-桨面都有较为明显的改变,主要表现为:冰-桨结构表面形状更不规则,这对结构化网格的更新有了更高的要求。由上一章可知,典型积冰条件下形成的冰极其不规则,为保证网格质量,需不断调整优化。

2) 典型速度-转速匹配的螺旋桨气动性能分析

选取前面章节得到了 3 组不同的速度-转速匹配组合,计算得到积冰后 $r/R=0.7$ 截面处的气流流场分布情况如图 14、图 15、图 16 所示。

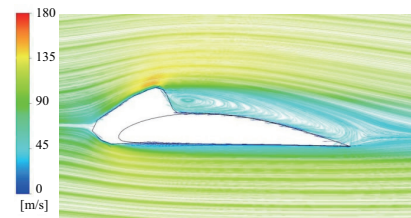


图 14 飞行速度 20 m/s、转速 3 900 r/min 流场分布

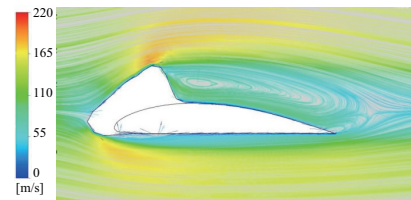


图 15 飞行速度 30 m/s、转速 5 100 r/min 流场分布

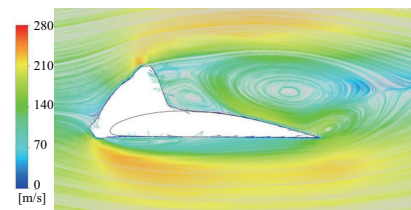


图 16 飞行速度 40 m/s、转速 6 600 r/min 流场分布

由图可知,在 3 组速度-转速匹配中均出现了压力面下游形成十分明显的角状冰,在角状冰后方形成大量涡,严重影响了螺旋桨的气动外形。

3) 积冰前后螺旋桨推力变化的初步研究

中小型无人机螺旋桨的推力是决定无人机飞行作战能力的重要参数,普通的机翼依靠翼型上下面的压强差而

产生升力,而无人机螺旋桨虽也有部分压强差的作用,但主要由扭转性极强的桨叶通过高速旋转将气流扫略至后方,从而产生向前的推力。螺旋桨的推力计算公式如下:

$$F = \rho_a A v^2 \quad (1)$$

其中: ρ_a 为空气密度; A 为通道面积; v 为气流速度。

以下为分别在3个最佳速度/转速匹配条件下积冰前后,取螺旋桨设计点,即 $r/R=0.7$ 位置后方的气流状态点进行速度提取,结果见表2。

表2 不同速度/转速下积冰前后典型气流状态点的速度变化

参数	20/3 900 匹配	30/5 100 匹配	40/6 600 匹配
结冰前速度/(m/s)	113.115	156.314	217.087
结冰后速度/(m/s)	105.648	140.642	182.744

由表2可知,每一组速度/转速匹配下,所选气流状态点在积冰后的速度均有所下降。基于前面的简化假设,将流场视为稳态,忽略空气密度和流通面积在积冰前后的变化,将积冰前后,气流速度的改变来描述螺旋桨推力变化。结合公式(1)得,螺旋桨推力也随之下降,影响飞机的气动特性。

螺旋桨推力变化情况见式(2)。

$$\Delta = \frac{F_2 - F_1}{F_1} \times 100\% \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)得到

$$\Delta = \frac{v_2^2 - v_1^2}{v_1^2} \times 100\% \quad (3)$$

其中:下标1为积冰前参数;下标2为积冰后参数。由此得到推力下降百分比在20/3 900匹配下,结冰后推力下降约13%;在30/5 100匹配下,结冰后推力下降约19%;在40/6 600匹配下,结冰后推力下降约29%。由此认为,随着速度-转速合速度的增大,覆冰螺旋桨推力下降幅度更大。

4 结语

本文将适用于旋转部件表面积冰模拟的模型应用到扭转性极强的2714型螺旋桨中,对其进行了不同速度下的飞行速度与螺旋桨转速匹配,研究了速度/转速匹配分别为20(m/s)/3 900(r/min)、30(m/s)/5 100(r/min)、40(m/s)/6 600(r/min)对于螺旋桨表面积冰规律,并对3组典型的速度/转速匹配进行了覆冰后的流场计算,又给出典型的气流状态点,分析螺旋桨积冰对推力的影响。分析得出以下结论:

a) 飞行速度与螺旋桨转速的匹配

1) 在螺旋桨转速为3 900 r/min的低转速下,飞行速度为20 m/s为最佳的速度匹配;

2) 在螺旋桨转速为5 100 r/min的中转速下,飞行速度为30 m/s为最佳的速度匹配;

3) 在螺旋桨转速为6 600 r/min的高转速下,飞行速度为40 m/s为最佳的速度匹配。

b) 随着速度/转速合速度的增大,局部水收集系数增大,对流换热系数增大,积冰量增大,冰层厚度增大,水膜厚度增大,总的积冰轮廓逐渐向下游发展成明显的角状冰。

c) 在3组典型的飞行速度/螺旋桨转速匹配点下,无人机螺旋桨表面形成了十分明显的角状冰,严重影响螺旋桨的气动外形和飞机的飞行能力。通过对比积冰前后典型气流状态点的速度变化,认为螺旋桨表面积冰降低了螺旋桨的推力,影响该无人机的飞行能力。

参考文献:

- [1] 洪程,高长水,刘壮.直升机旋翼电加热组件高频热载疲劳试验研究[J].机械制造与自动化,2020,49(2):25-27.
- [2] KIND R J, POTAPCZUK M G, FEO A, et al. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1998,34(5/6):257-345.
- [3] 裴燮刚,韩凤华.飞机防冰系统[M].北京:航空专业教材编审组,1996.
- [4] 郎需巍,刘星.数值模拟积冰翼型及气动特性分析[J].航空计算技术,2015,45(5):82-85.
- [5] U.S. Department of Transportation. Characteristics of runback ice accretions and their aerodynamic effects [Z]. Springfield: U.S. Department of Transportation, 2007.
- [6] 曹广州.迎风表面三维积冰的数学模型与计算方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [7] MYERS T G, CHARPIN J P F, THOMPSON C P. Slowly accreting ice due to supercooled water impacting on a cold surface[J]. Physics of Fluids, 2002,14(1):240-256.
- [8] DONOVAN W, HALE R, EWING M, et al. The design and development of the onboard systems for the meridian unmanned aircraft [C]//AIAA Infotech@ Aerospace 2007 Conference and Exhibit. Rohnert Park, California. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [9] CAO Y H, LI G Z, HESS R A. Helicopter flight characteristics in icing conditions[J]. The Aeronautical Journal, 2012, 116:963-979.
- [10] KORKAN K D, DADONE L, SHAW R J. Helicopter rotor performance degradation in natural icing encounter[J]. Journal of Aircraft, 1984,21(1):84-85.
- [11] KORKAN K D, CROSS E J Jr, MILLER T L. Performance degradation of a model helicopter rotor with a generic ice shape[J]. Journal of Aircraft, 1984,21(10):823-830.
- [12] KORKAN K D, DADONE L, SHAW R J. Performance degradation of helicopter rotor in forward flight due to ice [J]. Journal of Aircraft, 1985,22(8):713-718.
- [13] SEIFERT H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate[J]. Proceedings of Boreas VI, 2003(24): 50-55.
- [14] MYERS T G, CHARPIN J P F, CHAPMAN S J. The flow and solidification of a thin fluid film on an arbitrary three-dimensional surface[J]. Physics of Fluids, 2002,14(8):2788-2803.
- [15] MYERS T G, CHARPIN J P F. A mathematical model for atmospheric ice accretion and water flow on a cold surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004,47(25): 5483-5500.

收稿日期:2020-08-04