

风力机防冰热载荷计算

朱程香 付斌 孙志国 朱春玲

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京,210016)

摘要:采用一种新的基于压力和剪切力的溢流水流量计算方法进行部件表面防冰热载荷数值模拟。求解雷诺平均N-S方程,嵌入 $k-\omega$ SST湍流模型获得空气流场;欧拉法求解水滴质量和动量守恒方程,获得部件周围水滴速度分布和表面水滴撞击特性;基于传统的Messinger控制容积思想,分析控制体的各项热流,建立质量守恒和能量守恒方程,引入溢流水质量流量计算方程,封闭控制方程,求解方程组获得表面所需的防冰热载荷。采用本文提出的新的流量计算方法获得了NACA0012翼型表面的结冰冰形,并与试验数据进行对比,说明了流量计算方法的正确性。计算分析了不同条件下表面的防冰热载荷分布,结果表明,工作风速和液态水含量的变化既影响了防冰热载荷大小,也影响了溢流范围,而工作温度仅影响防冰热载荷,水滴平均容积直径仅影响溢流范围。

关键词:防冰热载荷;溢流水流量计算;压力;剪切力;Messinger模型

中图分类号:V215.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)05-0701-06

Calculation of Wind Turbine Anti-icing Heat Load

Zhu Chengxiang, Fu Bin, Sun Zhiguo, Zhu Chunling

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A new method of runback water mass calculation based on both pressure and shear stress is used to simulate the anti-icing heat load. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are solved to obtain the flow field around the airfoil with $k-\omega$ SST turbulence models. The droplet trajectories are acquired using the Eulerian method, based on which the local collection efficiency can be obtained. Adopting the traditional Messinger model, various heat fluxes of the control volume are analyzed, and the runback water mass calculation equation is induced to solve the mass and energy conservation equations. The ice shape on the NACA0012 profile is computed using the current runback water mass calculation method, and the results coincide with the experiment data under the same conditions. It shows that the new method illustrated in this paper is satisfactory. The heat loads in different conditions show that the changes in wind velocity and liquid water content affect both heat load and overflow area, whereas the temperature only affects the anti-icing heat load and the medium volume of water droplets only affects overflow area.

Key words: anti-icing heat load; runback water mass calculation; pressure; shear stress; Messinger model

随着商用风力机工作气象环境包线范围的增大,越来越多的风力机面临着结冰和防除冰问题^[1]。风力机叶片结冰,导致风力机阻力增大,升阻比以及扭转力矩减小,最终导致风力机产生功率损

耗,严重时,可导致风力机停转^[2];叶片表面覆盖不对称,外形不规则的冰层时,风力机会产生剧烈振动,这种振动可能导致相当多的冰层脱离叶片表面,若冰层对称脱落,则振动幅度会减小,但是若冰

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB714600)资助项目;国家自然科学基金(10972106)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2011-04-28; **修订日期:**2011-08-01

通讯作者:朱春玲,女,教授,博士生导师,1968年4月生,E-mail:chyq@nuaa.edu.cn。

层非对称脱落,振动幅度会大大增加,从而导致风力机停转^[3]。因此,为保证风力机正常有效工作,合理采取防除冰措施是必要的。

目前在风力机上采用的防除冰技术主要有微波热气防除冰系统、电热防除冰系统、气囊除冰系统以及憎水液涂层等,其中以热气和电热系统最为常用^[1]。无论采取何种防除冰技术,预测防护表面达到一定的温度时所需的热流是设计合理的防除冰系统的必要前提^[4-5]。因此,为了设计出高效合理的防除冰系统,准确预测防护表面的热载荷是非常重要的。

目前热载荷的计算一般基于 Messigner 有限体积思想,求解控制容积的质量和能量守恒方程,并假定溢流水沿着气流流线向后运动,从而获得表面的载荷分布。这种方法对于二维或者简单三维几何尚可实现,但是对于风力机,由于表面流线的捕捉存在较大难度,因此适应性较差。本文采用一种新的物面溢流水流量计算手段,主要研究了可用于二维和三维复杂部件表面的防冰热载荷计算方法,并计算了不同飞行条件和气象条件下的防冰热载荷,分析了各参数对防冰热载荷的影响。

1 防冰热载荷计算方法简介

防冰热载荷分析包括:(1)部件周围空气流场计算^[6-7]; (2)部件周围水滴运动场和水滴撞击特性计算^[8]; (3)部件表面热流分析及防冰热负荷计算^[9-10]。

1.1 部件周围流场计算

采用有限体积法求解不可压缩雷诺平均 Navier-Stoke 方程,为使方程封闭,引入两方程的剪切力输运 $k-\omega$ SST 湍流模型,该湍流模型具有良好的稳定性和收敛性。计算区域包括叶片周围的旋转区域和外层的静止区域。外层入口边界距离叶片 $10L$ (L 为叶片展长),出口边界距离叶片 $11L$,上下边界距离翼型 $10L$,入口边界给定来流的压力、速度、温度和湍流强度,出口边界给定出口静压。

1.2 部件周围水滴撞击特性计算

采用欧拉法计算水滴运动场,基于质量守恒和动量守恒原理建立控制方程如下

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

$$\frac{\partial(\alpha\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = K\alpha\rho(\mathbf{u}_a - \mathbf{u}) + \alpha\rho\mathbf{F} \quad (2)$$

式中: α 为水滴体积分数; \mathbf{u} 为水滴速度矢量; K 为惯性系数; \mathbf{u}_a 为气流速度矢量; ρ 为水滴密度; \mathbf{F} 为除空气阻力之外的其他外力。

基于有限体积法求解控制方程,采用四阶 Rung-Kutta 格式离散时间项,中心差分格式离散空间项,进出口边界速度和体积分数均取来流值,壁面边界采用无穿透性边界条件。

局部水收集系数是指微元表面实际水收集率与最大可能水收集率之比,根据水滴运动场的计算结果,采用式(3),计算局部水收集系数 β

$$\beta = \frac{\alpha(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})}{\alpha_\infty V_0} \quad (3)$$

式中: \mathbf{n} 为单位面积矢量; α_∞, V_0 分别为来流体积分数和气流速度。

1.3 防冰热载荷计算数学模型

在部件表面划分若干个微小的控制体,对于任意一个网格 P ,与其相邻的 4 个网格分别命名为网格 N , 网格 E , 网格 W , 网格 S ; $\mathbf{r}_{we}, \mathbf{r}_{sn}$ 分别表示控制容积东西和南北方向单位矢量,表面网格系统如图 1 所示。对于每个控制体,可列出防除冰系统工作时水滴的质量平衡方程(4~6)和能量平衡方程^[12](7~9)

$$m_{\text{clt}} + \sum m_{\text{in}} - m_{\text{evp}} - \sum m_{\text{out}} = 0 \quad (4)$$

$$\sum m_{\text{in}} = m_{\text{inw}} + m_{\text{ine}} + m_{\text{ins}} + m_{\text{inn}} \quad (5)$$

$$\sum m_{\text{out}} = |m_{\text{outwe}}| + |m_{\text{outsn}}| \quad (6)$$

$$q_{\text{clt}} + \sum q_{\text{in}} + q_n - q_{\text{evp}} - q_{\text{cnv}} - \sum q_{\text{out}} = 0 \quad (7)$$

$$\sum q_{\text{in}} = q_{\text{inw}} + q_{\text{ine}} + q_{\text{ins}} + q_{\text{inn}} \quad (8)$$

$$\sum q_{\text{out}} = \sum m_{\text{out}} [c_i \cdot T_m + L_F + c_w \cdot (T_{\text{sur}} - T_m)] \quad (9)$$

式中: q_{cnv} 表示对流换热热流和由于附面层摩擦引起的气流对表面的气动加热比热流; q_{evp} 为表面水蒸发或者冰升华所需的比热流; q_{clt} 为加热所收集到水滴的比热流和水滴动能转化的比热流; q_n 为防除冰系统工作时的加热热流

$$q_{\text{cnv}} = h_c \cdot (T_{\text{sur}} - T_{\text{rec}}) \quad (10)$$

$$q_{\text{clt}} = m_{\text{clt}} [c_i \cdot T_m + L_F + c_w \cdot (T_w - T_m) + V_d^2/2] \quad (11)$$

$$q_{\text{evp}} = m_{\text{evp}} [c_i \cdot T_m + L_F + c_w \cdot (T_{\text{sur}} - T_m) + L_E] \quad (12)$$

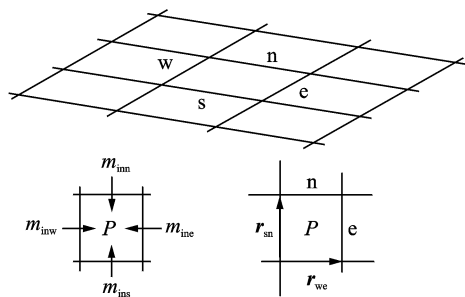


图1 表面网格系统示意图

式中: h_c 为气流与表面的对流换热系数; T_{sur} 为表面温度; T_{rec} 为气流附面层恢复温度; m_{clt} 为表面单位面积上收集到的水量; c_w 水滴的定压比热容; T_∞ 为来流静温; V_d 为水滴撞击表面时的速度; m_{evp} 单位面积水的蒸发速率; L_E 为水的汽化潜热; c_i 为冰的定压比热容。

下标 in_w 表示由网格 W 进入网格 P 的溢流水项; ine 表示由网格 E 进入网格 P 的溢流水项; ins 表示由网格 S 进入网格 P 的溢流水项; inn 表示由网格 N 进入网格 P 的溢流水项; out_{we} 表示网格 P 东西方向的溢流水项; out_{sn} 表示南北方向的溢流水项。

对于每一个控制容积, n, e, w, s 四条边上的溢流水正方向进行如下规定: 东西和南北两方向上的溢流水正方向分别与 r_{we}, r_{sn} 一致。以东西方向为例, 若 $m_{out_{we}} = 0$, 则表示网格 P 在东西方向没有溢流水, 通过 w 和 e 边分别流入网格 W 和网格 E 的水滴质量为 0; 若 $m_{out_{we}} > 0$, 则表示网格 P 中的水滴通过 e 边发生溢流, 质量为 $m_{out_{we}}$; 若 $m_{out_{we}} < 0$, 则表示网格 P 中的水滴通过 w 边发生溢流, 质量为 $m_{out_{we}}$ 。

1.4 基于压力和剪切力的流量计算方法

控制方程 (4~9) 共有 7 个未知数: $m_{in_w}, m_{ine}, m_{ins}, m_{inn}, m_{out_{we}}, m_{out_{sn}}, q_{in}$, 而控制方程仅有 6 个, 因此为了封闭方程组, 需要添加一个方程。从 1.3 节分析的表面网格系统及溢流水流动趋势可知, 溢流水质量与流入控制体水滴质量之间存在一定的关系, 本节的重点就是确定溢流水的流动方向和质量。

溢流水是水膜在气流驱动力、表面张力等共同作用下运动的。2000 年, Rothmayer 和 Tsao 研究了用于描述水膜界面波传递的边界层理论^[11], 结果表明, 水膜表面波的传递和水膜内的质量输运主要受物面附近空气的压力梯度和剪切应力影响, 即

$$m_{water} \propto p_{air} + \tau_{air} \quad (13)$$

式中: m_{water} 表示溢流水质流矢量; p_{air} 表示压力梯度; τ_{air} 表示剪切应力。

因此可采用以下溢流水计算方法

$$\begin{cases} m_{out_{we}} = \frac{f_{we}}{|f_{we}| + |f_{sn}|} \cdot \sum m_{out} \\ m_{out_{sn}} = \frac{f_{sn}}{|f_{we}| + |f_{sn}|} \cdot \sum m_{out} \end{cases} \quad (14)$$

式中: f_{we}, f_{sn} 分别为压力梯度与剪切应力矢量之和在控制容积东西和南北方向上的分量。

当前所研究的网格 P 中的入流量, 应当为相邻控制容积的溢流量, 故可采用式 (15) 进行计算

$$\begin{aligned} m_{in_w} &= \max([m_{out_{we}}]_w, 0), m_{ine} = \max([-m_{out_{we}}]_e, 0) \\ m_{ins} &= \max([m_{out_{sn}}]_s, 0), m_{inn} = \max([-m_{out_{sn}}]_n, 0) \end{aligned} \quad (15)$$

1.5 控制方程求解流程

基于以上分析, 控制方程的求解流程如图 2 所示:

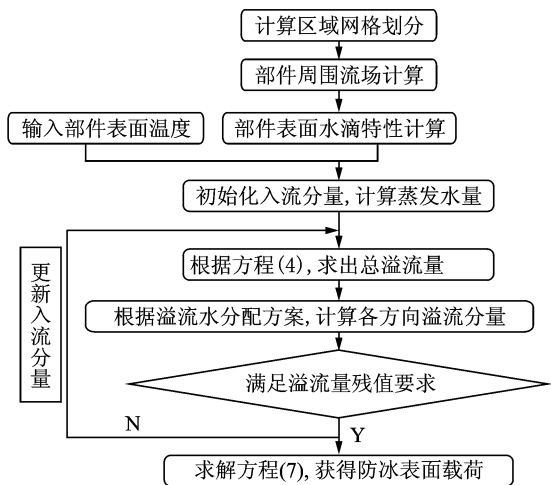


图 2 防冰表面热载荷计算流程

2 计算方法验证

由于防冰热载荷的计算缺乏试验数据, 为了验证本文所采用的基于压力和剪切力的质量流量计算方法的正确性, 本文采用相同的流量计算方法求解了未进行防除冰时部件表面的结冰冰形, 冰形的求解方法与热载荷求解方法类似, 不同点在于求解冰形时, 增加了水滴冻结引起的质量和能量传递, 并且能量方程中无热载荷项。本文将冰形的计算结果与冰风洞试验数据进行了比较。图 3 为飞行速度为 67 m/s, 压力 101 325 Pa, 迎角 4°, 结冰温度 268.69 K, 液态水含量 (Liquid water content, LWC, 用符号 w 表示) 1.0 g/m³, 水滴平均容积直径 (Medium volume diameter, MVD, 用符号 d 表示) 20 μm, 结冰时间 360 s 时 NACA0012 机翼表面的三维结冰冰形。图 4 为图 3 对应的二维结冰冰形与冰风洞试验数据和 NASA 的 LEWICE 软件模拟结果的对比图^[12]。由图可见, 采用本文计算方法获得的结冰冰形与试验值及 LEWICE 模拟结果均吻合得很好, 说明了本文采用的新的质量流量计算方法的正确性。

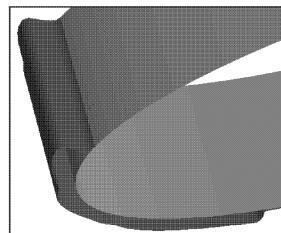


图 3 表面三维冰形图

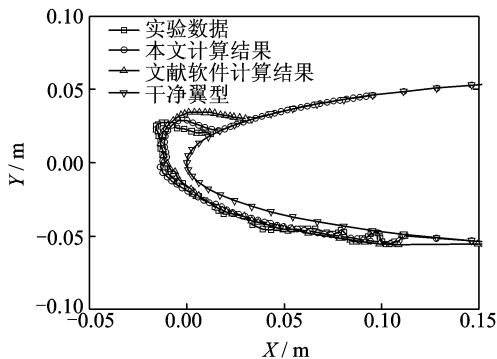


图4 本文计算的二维冰形与试验数据及LEWICE预测结果的对比图

3 计算结果及分析

对于任何旋转机械,当地相对速度均随着展向距离的增加而增大,由此导致部件表面收集到的水量和防冰热载荷也随着展向距离的增加而增大。由于风力机叶片上距离翼根85%~100%之间的区域对于风力发电而言最重要,因此本文重点研究的某商用风力机翼型截面(叶片翼型为S809)位于风力机叶片上距离翼根85%的位置。

本文计算了风力机在表1所示的计算条件下的三维空气流场,截取二维截面的流场数据,在此基础上计算二维翼型表面的水滴撞击特性,并作为翼型表面热载荷分析的输入条件。为了采用本文所述的溢流水计算方法,在计算热载荷时,将翼型进行了等截面拉伸。主要原因是本文的主要目的是尝试一种适用于三维表面的热载荷计算方法,因此采用三维几何进行研究,便于后期完善了旋转机械的水滴撞击特性研究后,对于风力机整机进行热载荷计算。

在表1所示的计算条件下,S809翼型防冰表面温度为300 K时所需的比热流($q_{-required}$)分布如图5所示。可以看出,由于水滴撞击区域集中在翼型前缘,因此热载荷主要分布在前缘。

为了直观地比较防冰表面各项热流密度的大小,图6~8给出了防冰表面各项热流密度云图($q_{-convect}$ 为对流项热流, $q_{-evaporate}$ 为蒸发项热流, $q_{-droplet}$ 为表面水滴换热热流)。比较各热流密度的大小,可以发现,气流换热项比热流和水滴蒸发项所占的比例较大。

表1 飞行条件及气象条件

参数	数据
飞行迎角/(°)	0
飞行压力/Pa	101 325
静温/°C	-10
工作风速/(m·s ⁻¹)	9
旋转速度/(r·min ⁻¹)	18.6
ω /(g·m ⁻³)	0.5
$d/\mu\text{m}$	20

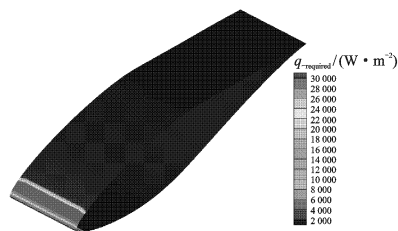


图5 湿防冰条件下表面热载荷分布云图

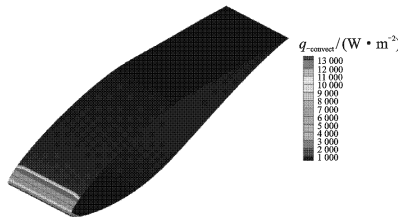


图6 防冰表面气流换热热流分布云图

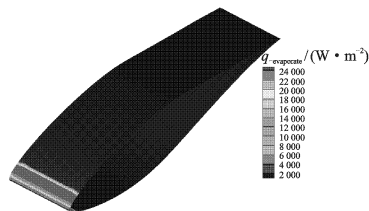


图7 防冰表面蒸发或升华热流分布云图

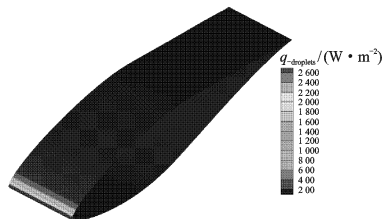


图8 防冰表面水滴换热热流分布云图

4 各参数对防冰热载荷的影响分析

4.1 不同工作风速条件下的计算结果分析

图9显示了工作风速分别为9,11和13 m/s,表面温度为300 K时,S809翼型表面所需热载荷随量纲一表面距离(S/c ,其中 S 为翼型表面任意位置距离前缘点的表面距离, c 为翼型弦长, S/c 为正,表示翼型上表面,为负表示翼型下表面)的变化关系曲线。由图可以看出,风速越大,翼型表面所需的热载荷越大,溢流水覆盖的范围越大。这是因为工作风速越大,空气与部件表面的对流换热系数越大,从而导致气流对流项热流增大,且对流换热系数增大还会导致传质系数增大,从而使得蒸发项热

流增大,最终导致防冰表面所需热流增大。同时,速度增大后,使得表面的局部水收集系数增大,收集到的水量增多,溢流范围增大,需要提供热量的范围增大。

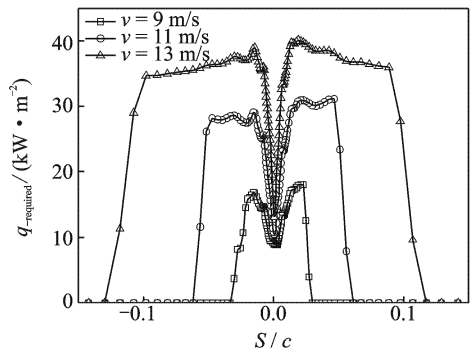


图9 不同风速条件下热载荷变化曲线

4.2 不同工作环境温度条件下的计算结果分析

图10显示了环境温度分别为270.65,263.15和253.15 K时,翼型表面所需热载荷随量纲一表面距离的变化关系曲线。可以看出,环境温度越低,相同位置所需的热载荷越大。主要原因是环境温度降低后,水滴换热比热流增大,防冰热载荷增大。

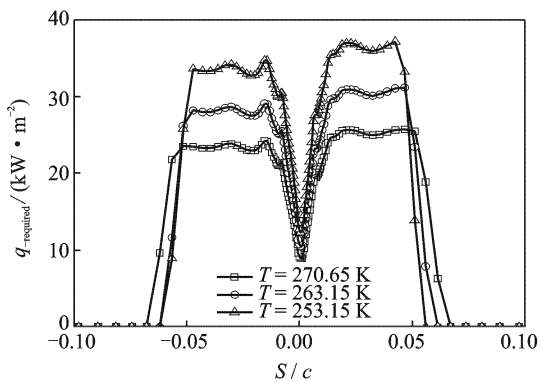


图10 不同环境温度条件下热载荷变化曲线

4.3 不同工作压力条件下的计算结果分析

图11显示了压力分别为101 325,69 662.9和47 173.68 Pa时,翼型表面所需热载荷随量纲一表面距离的变化关系曲线。由图可以看出,压力变化对翼型表面所需热载荷影响较小。

4.4 不同d条件下的计算结果分析

图12显示了d分别为20,25,30,40 μm时,翼型表面所需热载荷随量纲一表面距离的变化关系曲线。由图可见,水滴直径增大,水滴撞击范围增大,因此需要提供热量的表面范围增大,但是前缘所需的热载荷差别很小。

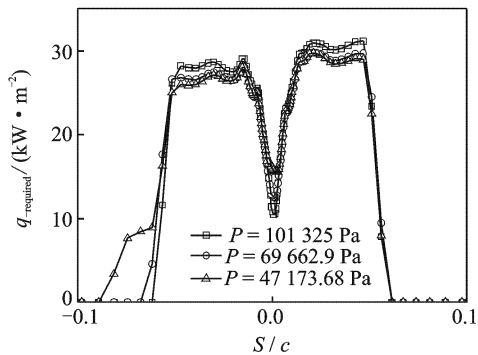


图11 不同环境压力条件下热载荷变化曲线

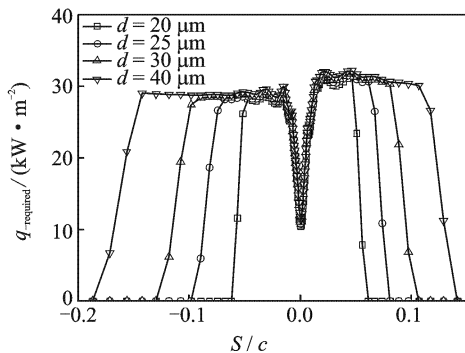


图12 不同d条件下热载荷变化曲线

4.5 不同w条件下的计算结果分析

图13显示了w分别为0.1,0.5和0.8 g/m³时,翼型表面所需热载荷随量纲一表面距离的变化关系曲线。由图可见,w为0.1 g/m³时的溢流范围与w为0.5 g/m³时的溢流范围较接近,但w为0.8 g/m³时的溢流范围大很多。这是因为w增大时,水滴收集量增大,需要在一定范围内蒸发表面水滴所需要的表面温度升高,本文在进行计算时,统一将表面温度设定为300 K。当w为0.1和0.5 g/m³时,此温度尚可保证表面水在较小溢流范围内完全蒸发,当w增加到0.8 g/m³时,较多液态水不能完全蒸发而向翼型后方流动,在翼型后方吸收热量完全蒸发。

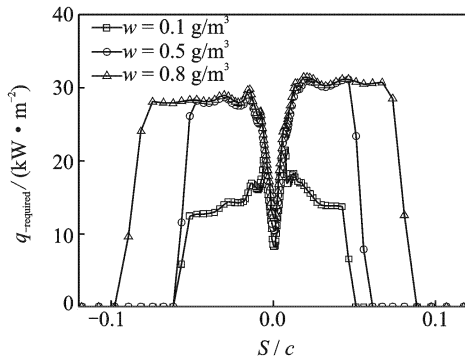


图13 不同w条件下热载荷变化曲线

5 结 论

采用一种新的基于压力和剪切力的流量计算方法,根据 Messinger 控制容积思想,求解表面质量和能量守恒方程,获得载荷分布。以风力机叶片翼型 S809 为研究对象,计算了表面的各项热流分布,并计算了不同条件下翼型表面的防冰热载荷,结果表明:

(1)工作风速越大,相同位置所需的防冰热载荷越大,需要防冰的表面范围越大;

(2)工作温度越低,相同位置所需的防冰热载荷越大;

(3)工作压力对于防冰热载荷的影响较小,可忽略不计;

(4)MVD 增大,需要防冰的表面范围增大,但相同位置所需的防冰载荷变化很小;

(5)LWC 增大,需要防冰的表面范围增大,同时相同位置所需的防冰热载荷增大。

参考文献:

[1] Fortin G, Perron J. Wind turbine icing and de-icing [R]. AIAA 2009-274, 2009.

[2] Matthew C H, Muhammad S V, Tomas W, et al. Effect of atmospheric temperature and droplet size variation on ice accretion of wind turbine blades[J]. Wind Energy, 2010,98(12):724-729.

[3] Duncan T, LeBlanc M, Morgan C, et al. Understanding icing losses and risk of ice throw at operating wind farms[J]. Winterwind, 2008,45(1):35-41.

[4] Laakso T, Holttinen H, Tonsten G, et al. State-of-the-art of wind energy in cold climates[M]. [S.l.]: VTT Technical Research Centre of Finland, 2010.

[5] 裘燮纲,韩风华. 飞机防冰系统[M]. 北京:[s. n.]: 1985.

[6] Chung J, Choo Y, Reehorst A, et al. Navier-Stokes analysis of flowfield characteristics of an ice-contaminated aircraft wing[R]. AIAA 1999-0375, 1999.

[7] Shim J, Chung J, Lee K D. A comparison of turbulence modeling in flow analysis of iced airfoils[R]. AIAA 2000-3920, 2000.

[8] Wirogo S, Srirambhatla S. An Eulerian method to calculate the collection efficiency on two and three dimensional bodies[R]. AIAA 2003-1073, 2003.

[9] Gary A R, Brian M B. Users manual for the NASA LEWICE ice accretion prediction code (LEWICE) [R]. NASA CR-185129, 1990.

[10] Tim G M. Extension to the messinger model for aircraft icing[J]. AIAA Journal, 2001,39(2):211-218.

[11] Rothmayer A, Tsao J. Water film runback on an airfoil surface[R]. AIAA 2000-0237, 2000.

[12] Hsun H C, Tuncer C. A turbulence model for iced airfoils and its validation[R]. AIAA 92-0417, 1992.