

文章编号: 0258-1825(2013)02-0260-06

水平轴风力机结冰探测器设计

易 贤¹, 赵 萍², 陈 坤¹, 朱国林¹

(1. 空气动力学国家重点实验室 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000;

2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘 要:针对风力机结冰问题,提出了一种采用外置设备进行结冰探测的方法,该方法的基本思路是将传感器集成在独立于风力机之外的结冰探测器上,通过对该外置结冰探测器的结冰进行探测,获知风力机的结冰;给出了外置式结冰探测器设计的基本方法和步骤,建立了设计结冰探测器外形所需要的数值算法,包括空气流场计算的MRF方法、水滴运动轨迹计算的拉格朗日法、结冰的快速计算方法;采用本文方法对某1.5MW级水平轴风力机进行了结冰探测器设计,得到的探测器可以实时反映风力机叶片结冰的情况,说明本文提出的设计思路及方法是行之有效的,以上工作为进一步发展风力机结冰防护技术打下了良好基础。

关键词:风力机;结冰;结冰探测器;外形设计;数值计算

中图分类号:TK83 **文献标识码:**A

0 引 言

风力机在寒冷的气候(温度低于0℃)环境下运行时,如果遇到含有过冷水滴的气流,或者遭遇雨雪天气,在风力机表面(包括叶片、轮毂、机舱、塔架、风速风向仪等风力机所有部件表面)会发生结冰现象。结冰会改变叶片的气动外形,破坏风力机的流场特性,使风能利用系数降低,减小出力;同时,结冰还会引起额外的过载及振动,冰载荷的不平衡会增加机组部件的疲劳,轻者,使风力机停止运行,带来经济损失,重者,造成叶片损坏甚至导致整个风机倒塌,危及人们的生命财产安全。鉴于风力机结冰的危害,近年来人们越来越重视这方面的研究^[1-4]。

风力机结冰探测是指采用结冰传感器,探测风力机结冰的情况,探测结果可以为风力机的控制和运行、防除冰系统的设计提供依据。风力机结冰探测一般采用两种方法,一种是目测法,一种是仪器测量法。目测法只等得到直观定性结果,而且受到观察时间的影响,有较多不足。仪器测量法是指采用结冰传感器探测结冰,通常是将结冰传感器嵌入至风力机叶片上,这种方式的优点是可以得到比较准确的结冰信息,而且可以全天候监测结冰,不足之处是需要完

整的叶片上打孔,或者在叶片生产时预留加工孔,不但会带来额外的制造加工负担,还会破坏叶片的完整性,降低部件的抗疲劳性能。为此,本文提出一种外置式结冰探测方法,其基本思路是将传感器集成在独立于风力机之外的外置结冰探测器上,通过探测该外置结冰探测器的结冰,获知风力机的结冰。这种方式克服了常规的嵌入式结冰探测的不足,但需要对结冰探测器进行专门设计,另外,由于要通过探测器结冰反映风力机结冰,还必须建立探测器结冰和风力机结冰之间的联系。采用该方法,针对某1.5MW级水平轴风力机,我们设计了相应的外置式结冰探测器,本文将介绍设计的基本思路和步骤、给出设计所采用的数值方法以及探测器外形设计的初步结果。

1 结冰探测器设计的基本思路和步骤

风力机结冰包括沉积结冰(Precipitation Icing,主要由冻雨和湿雪引起)和过冷水滴结冰(In-Cloud Icing,主要由过冷水滴撞击在风力机表面所引起)两种形式^[3],其中过冷水滴结冰是低温气象条件下常见的一种结冰形式。因此,本文的设计将主要针对过冷水滴结冰进行,同时尽量兼顾沉积结冰。

结冰探测器设计的基本思路和步骤如下:

* 收稿日期:2012-05-01; 修订日期:2012-08-11

基金项目:国家自然科学基金(11172314)

作者简介:易 贤(1977-),男,四川金堂人,副研究员,研究方向:飞行器及风力机结冰. E-mail:yixian_2000@163.com

(1) 根据风力机的空气流动特性、以及水滴在风力机流场中的运动特性,给出探测器初步外形及其在风力机上的放置方案;

(2) 计算探测器的水滴撞击特性,与风力机的水滴撞击特性进行对比分析,对探测器的外形进行优化;

(3) 通过计算,建立探测器结冰和风力机结冰之间的联系;

(4) 选取并确定结冰探测器表面传感器的布置位置;

(5) 根据结冰对气动特性影响研究的结果,制定探测器结冰的告警准则;

(6) 研制相应的结冰探测电子信息系统。

2 设计方法

2.1 风力机空气流场计算方法

进行结冰探测器气动外形设计,需要计算风力机的空气流场,本文采用多参考坐标系(MRF)方法计算风力机流场,MRF方法的基本思路为:将计算区域分为旋转区和非旋转区,在非旋转区,流动的控制方程为惯性坐标系下的方程,在旋转区域,流动的控制方程为旋转坐标系下的控制方程。对不同区域的流动分别进行求解,在区域的交界面上,要求流场的参数完全一致。

非旋转区域空气流场计算的控制方程为低速粘流的时均 N-S 方程,其通用形式为:

$$\frac{\partial(\rho_a \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{v}_a \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) = q_\phi \quad (1)$$

方程(1)中, ϕ 为输运变量, ρ_a 为空气密度, \mathbf{v}_a 为空气速度, Γ_ϕ 为扩散系数, q_ϕ 为源项, ϕ 、 Γ_ϕ 和 q_ϕ 取不同的值,可代表空气的连续性方程、动量方程和其他标量(如湍动能等)的输运方程。

在旋转区域内,控制方程也可以写成输运方程的形式:

$$\frac{\partial(\rho_a \phi)}{\partial y} + \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{v}_{ar} \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) = q_{\phi r} \quad (2)$$

方程(2)中, \mathbf{v}_{ar} 为空气在旋转坐标系中的速度, $q_{\phi r}$ 为旋转坐标系中的源项。当 $\phi = 1$ 、 $q_{\phi r} = 0$ 时,方程(2)为连续性方程,当 $\phi = \mathbf{v}_{ar}$ 时,方程(2)为动量方程,此时源项的表达式为:

$$q_{\phi r} = q_\phi - \rho_a [2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_{ar} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})] \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\omega}$ 为旋转角速度, \mathbf{r} 为流体质点在旋转坐标系中

的矢径。

在旋转区域和非旋转区域的交界面上,要求流场参数一致,两个坐标系内的速度关系为:

$$\mathbf{v}_{ar} = \dot{\mathbf{v}}_a - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (4)$$

对于方程(1)和(2),对流项和源项均采用有限体积法进行离散,时间项采用二阶隐式离散,采用SIMPLE方法计算压力,湍流模型为标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,具体的数值方法可参见文献[5]。

2.2 风力机流场中水滴运动轨迹计算方法

为了确定探测器的放置位置,需要研究风力机流场中水滴的运动轨迹,我们采用拉格朗日法计算水滴运动轨迹,三维水滴运动方程可以写成^[6]:

$$M_d \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = (\rho_d - \rho_a) V_d \mathbf{g} + \frac{1}{2} \rho_a A_d C_d |\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_d| (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_d) \quad (5)$$

其中, M_d 是水滴质量, A_d 是水滴的迎风面积, V_d 是水滴体积, C_d 是阻力系数, ρ_d 是水滴密度, \mathbf{x} 是水滴的位置矢量, \mathbf{g} 是重力加速度矢量, \mathbf{v}_d 为水滴速度。

定义相对雷诺数 Re ,其表达式为:

$$Re = \frac{\rho_a |\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_d| Deq}{\mu} \quad (6)$$

式中, Deq 为水滴直径, μ 为空气的粘性系数,则式(5)可写成如下形式:

$$\mathbf{a} = \left[\frac{C_d Re}{24} \right] \frac{1}{K_1} (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_d) + K_2 \mathbf{g} \quad (7)$$

其中, \mathbf{a} 为水滴运动的加速度, K_1 、 K_2 的表达式分别为

$$K_1 = \frac{1}{18} \frac{\rho_d}{\mu} Deq \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_d} \quad (9)$$

完成流场计算得到空气速度之后,方程(7)成为常微分方程,本文采用一阶欧拉法对其进行数值积分求解。设 t_n 时刻水滴的位置为 \mathbf{x}_n ,速度为 $\mathbf{v}_{d,n}$,加速度为 \mathbf{a}_n ,则水滴在时刻 t_{n+1} 的位置和速度分别为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{v}_{d,n} \Delta t + \mathbf{x}_n \\ \mathbf{v}_{d,n+1} = \mathbf{a}_n \Delta t + \mathbf{v}_{d,n} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\Delta t = t_{n+1} - t_n$,为积分时间步长。

2.3 结冰的快速计算

为了建立探测器结冰与风力机结冰之间的联系,需要对探测器结冰和风力机结冰情况进行快速计算,我们采用如下公式计算结冰厚度^[6]:

$$h = \frac{f \cdot \beta \cdot LWC \cdot V \cdot dt}{\rho_i} \quad (11)$$

其中 f 为冻结系数 ($0 \leq f \leq 1$), β 为当地的水滴收集率, LWC 为空气中的液态水含量, V 为来流速度, dt 为结冰时间, ρ_i 为冰的密度。

在设计分析过程中,式(11)中 f 取值为1, LWC 、 V 、 dt 和 ρ_i 均是输入条件,人为给定,因此只有水滴收集率 β 和外形密切相关,需要根据不同的外形通过计算获得。本文采用欧拉法计算水滴收集率,水滴相方程的求解统一在惯性坐标系中进行,记空间微团中水滴相所占的体积比例为水滴容积分数 α ,则可以建立水滴相的控制方程,包括连续方程和动量方程,分别为:

$$\frac{\partial(\rho_d \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \alpha \mathbf{v}_d) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho_d \alpha \mathbf{v}_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \alpha \mathbf{v}_d \mathbf{v}_d) = \rho_d \alpha K (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_d) + \rho_d \alpha \mathbf{g} \quad (13)$$

方程(12)、(13)中, K 为惯性因子^[7]。与空气控制方程类似,水滴相控制方程可以统一写成不包括扩散项的输运方程形式:

$$\frac{\partial(\rho_d \alpha \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \alpha \mathbf{v}_d \phi) = q_{\phi} \quad (14)$$

式中, q_{ϕ} 为源项,当 ϕ 分别取 1、 \mathbf{v}_d 时,代表连续方程和动量方程。

对于方程(14),对流项和源项的离散方法与方程(1)、(2)一致,时间项采用一阶显式离散。与空气流场计算在壁面采用无滑移壁面边界条件不同,对于水滴相计算,采用壁面吸入边界条件,即如果水滴与物面碰撞,则认为水滴从碰撞点流出。

水滴收集率 β 可在获得当地水滴容积分数 α 和水滴与物面的相对速度 \mathbf{v}_{dr} 之后,由以下表达式得到:

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha_{\infty}} \frac{|\mathbf{v}_{dr} \cdot \mathbf{n}|}{|\mathbf{v}_{\infty}|} \quad (15)$$

其中, α_{∞} 为远场水滴容积分数, \mathbf{v}_{∞} 为远场来流速度, \mathbf{n} 为物面碰撞点处的单位法线向量。

3 设计过程及结果

3.1 风力机构型及坐标

选用某 1.5MW 级水平轴风力机作为设计对象。该风力机半径为 41m,图 1 显示的是风力机构型及坐标,设计和计算时忽略塔架的影响,坐标原点取为风力机轮毂中心,坐标轴方向为: x 轴与远场来流方向一

致, y 轴垂直向上, z 轴按右手系确定。计算采用多块对接网格,网格规模为 1800 万,图 2 显示了风力机表面轮毂附近的网格。

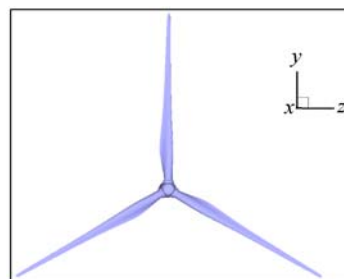


图 1 风力机构型及坐标

Fig. 1 Wind turbine configuration and frame

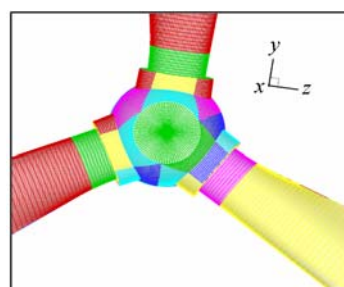


图 2 轮毂附近表面网格

Fig. 2 Grids near the hub

3.2 探测器放置位置

为了确定探测器的位置,首先计算了绕风力机的空气流场。图 3 显示的是绕风力机的空间流线,计算速度为 11m/s,该图显示,在风力机流场中,空气流线在接近风力机之前,都是与来流风向一致,随着位置接近风轮,流线开始向风力机转动的方向弯折,离风轮平面越近,弯折的幅度越大,在风轮之后,随着位置离开风轮,流线又逐渐恢复至原来的方向。很明显,叶片的转动是导致空气流线偏折的主要原因,同时,由于风力机的转速始终不会太高,流线在风轮之后总会恢复至原来的方向。

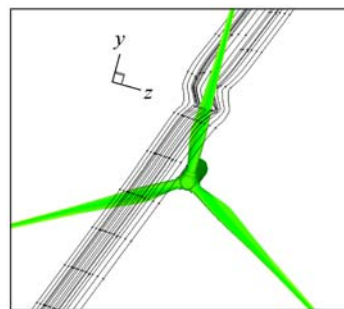


图 3 风力机流场的空气流线

Fig. 3 Typical streamlines around the wind turbine

其次计算了风力机流场中水滴运动轨迹,图 4 显示的是直径为 $100\mu\text{m}$ 的水滴在风力机流场中的轨迹(红色图线),图中黑色图线为空气流线,可见水滴轨迹与空气流线基本重合,在空气流线弯折之处,水滴在惯性作用下保持原来运动方向的能力更强,因此水滴运动轨迹不如空气流线弯折的幅度大,两者在靠近风轮的前后的分开,随着位置离开风轮,再逐渐恢复并重合。

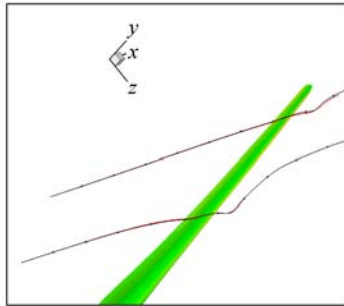


图 4 水滴运动轨迹与空气流线的关系
Fig. 4 Droplet trajectories and air streamlines

以上计算结果说明,叶片的转动不能阻挡水滴通过风轮平面,而风轮之后的机舱上有较多的空余空间,为了保证水滴能够撞击在结冰探测器上面(使探测器结冰),同时又不破坏风力机的叶片结构,不影响风力机的气动特性,可以将探测器置于机舱之上。

3.3 探测器外形布局设计

对于结冰探测器外形,设计的出发点是希望探测器既能反映风力机叶片不同部位的结冰,同时又方便传感器的集成、电子信息系统及线路的安装等。为此,我们提出了图 5(a)、(b)所示的布局外形。其中,图 5(a)显示的是探测器的正面和背面,图 5(b)显示的是探测器侧面和底面。整个探测器由四部分构成:第一部分是主体部分,为空心、立式的腔体,其前缘为半圆柱,半径上小下大,半圆柱之后是平滑张开的平面墙,空心的墙体内部可以放置探测器的电子信息系统;第二部分为墙体上方、靠前部的半圆盘;第三部分为墙体上方、半圆盘之后的凸起脊背;第四部分为用于螺纹固定的底座;探测器表面圆圈标记是布置传感器的位置。

3.4 探测器外形优化

确定了以上探测器的布局和传感器的大致位置,我们通过迭代计算,对探测器外形进行了优化。优化的基本出发点是基于水滴收集率和结冰变化的两条规律:

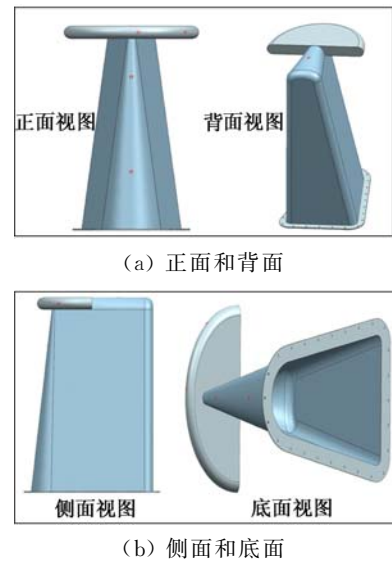


图 5 探测器外形

Fig. 5 Configuration of the detector

- (1) 与气流相对速度越大,结冰越严重;
- (2) 迎风面前缘半径越小,结冰越严重。

为了使探测器的外形设计能够实现预期的设计目标,通过优化计算,得到了探测器的外形和尺寸。图 6 给出了传感器在探测器表面的位置示意图及编号。之所以如此布置传感器,主要是希望通过传感器 1 和 2、传感器 3 和 4 组合的探测结果能够反映叶片中部及叶尖的结冰,传感器 5 能够反映冻雨结冰(冻雨从上往下落)。

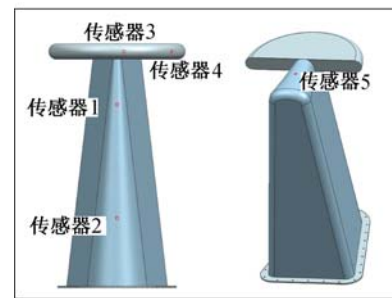


图 6 传感器在探测器表面的位置示意及编号

Fig. 6 Distribution of sensors on the probe

3.5 探测效果仿真及分析

以叶片上 $y=40\text{m}$ 处的水滴收集率代表叶尖处的水滴收集率,记为 β_1 , $y=31\text{m}$ 处的水滴收集率代表叶片外部的的水滴收集率,记为 β_2 , $y=22\text{m}$ 处的水滴收集率代表叶片中部的的水滴收集率,记为 β_3 。记探测器表面传感器 1 处的水滴收集率为 α_1 ,传感器 2 处的水滴收集率为 α_2 ,传感器 3 处的水滴收集率为 α_3 ,传感器 4 处的水滴收集率为 α_4 。如果要求传感器

1 和 2 的结冰能够反映风力机叶尖和叶片中外部的结冰,则有:

$$(\beta_1/\beta_2)_{\text{叶片}} = (\alpha_1/\alpha_2)_{\text{传感器}} \quad (16)$$

如果要求传感器 3 和 4 的结冰能够反映风力机叶片中部和中外部的结冰,则有:

$$(\beta_2/\beta_3)_{\text{叶片}} = (\alpha_3/\alpha_4)_{\text{传感器}} \quad (17)$$

将探测器置于机舱之上,我们进行了探测效果的数值仿真。计算的水滴直径分别为 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$,图 7 给出了探测器放置于机舱之上的示意图,图 8、图 9 分别给出了水滴直径为 $40\mu\text{m}$ 时,探测器表面水滴收集率云图。仿真结果显示,探测器表面传感器位置处的水滴收集率,可以很好满足式(16)和式(17)的要求。

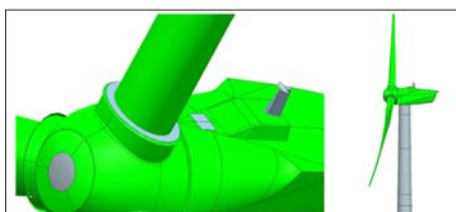


图 7 探测器放置于机舱之上的示意图

Fig. 7 Sketch of the wind turbine installed with the prober

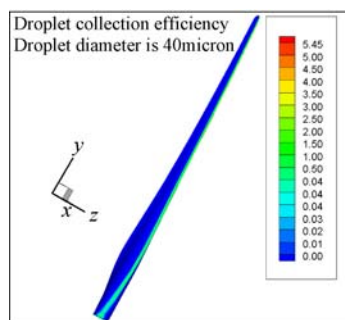


图 8 叶片表面水滴收集率云图

Fig. 8 Contour of collection efficiency on the blade

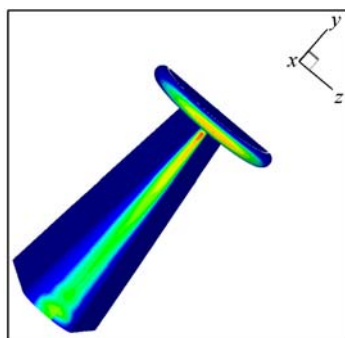


图 9 探测器表面水滴收集率云图

Fig. 9 Contour of collection efficiency on the prober

4 结 论

提出了一种采用外置设备进行结冰探测的方法,给出了外置式结冰探测器设计的基本思路和步骤,建立了设计结冰探测器外形所需要的数值算法,针对某 1.5MW 级水平轴风力机进行了结冰探测器设计,得到如下结论:

(1) 外置式结冰探测方法可以有效克服目测式结冰探测和嵌入式结冰探测方法的不足,是一种值得推广的方法;

(2) 数值仿真结果显示,本文针对某 1.5MW 级水平轴风力机所设计的结冰探测器,可以实时反映风力机叶片结冰的情况,说明本文提出的设计思路及方法行之有效,为进一步发展风力机结冰防护技术打下了基础;

(3) 除了探测器布局及外形设计,外置式结冰探测还有若干关键技术需要突破,如结冰告警准则的制定、准确可靠传感器的开发、电子信息及控制系统的研制等,这些都需要进行专门研究。

参 考 文 献:

- [1] FORTIN G, PERRON J. Wind turbine icing and de-icing [R]. AIAA-2009-0274, 2009.
- [2] FROHBOESE P, ANDERS A. Effects of icing on wind turbine fatigue loads[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(2007) 012061, 2007.
- [3] JASINSKI W J, NOE S C, SELIG M S, et al. Wind turbine performance under icing conditions[R]. AIAA-1997-0977, 1997.
- [4] HOCHART C, FORTIN G, PERRON J. Icing simulation of wind-turbine blades[R]. AIAA-2007-1373, 2007.
- [5] 易贤,王开春,桂业伟,等. 结冰面水滴收集率欧拉计算方法研究及应用[J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(5): 596-601.
- [6] 易贤. 飞机积冰的数值计算与积冰试验相似准则研究[D]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心, 2007.
- [7] KIND R J, POTAPCZUK M G. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena[J]. *Progress in Aerospace Science*, 1998, 34(5-6): 275-345.

