

国外寒冷地区风力机结冰问题研究

战培国*

中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳, 621000

摘要: 风力机结冰是影响寒冷地区风电场产能的重要因素之一。在广泛文献调研的基础上, 分析研究了地处寒区的加拿大在风力机结冰研究方面开展的工作。主要包括: 结冰气候条件, 结冰时风电场产能评估, 叶片结冰的风洞试验研究和数值模拟研究。总结了在风力机结冰研究方面取得的初步认知, 意在为我国该领域研究工作的开展提供参考。

关键词: 风力机; 结冰; 风力机叶片结冰; 结冰气候; 风电场

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 02-0001-06

风力机是现代绿色能源的重要来源之一, 其发展是航空技术在能源领域的拓展, 捕获风能的风力机叶片最初就采用飞机的机翼翼型。随着风力机功率的增长, 研究者利用最早被用于航空的空气动力学技术, 如风洞试验或CFD数值模拟计算, 针对风力机的大气工作环境开发了风力机专用翼型, 提高了风力机效率。应用于航空的复合材料等新型材料也在风力机得到应用。为了获得更好的风源地, 在寒冷地区设置风力发电场的情况越来越多, 其原因之一即寒冷地区风更大, 空气密度更高, 有利于风力发电。但寒冷气候条件下的风力机应用存在诸多技术问题, 例如, 保护机械和液压零件需要装备加热装置; 海上风力机在寒冷气象条件下, 空气中水汽含量较高或海浪飞溅形成水雾等因素, 会使风力机霜冻和结冰等。结冰会造成风力机效能下降或破坏, 为了解决风力机结冰问题, 飞机结冰研究的成果开始向风力机应用领域拓展。本文主要分析近年来加拿大针对寒冷地区风力机开展的相关研究, 目的是为国内风能领域相关问题及飞机结冰问题研究提供参考。

1 结冰气候条件和风电场产能评估

1.1 风力机结冰气候条件

欧美寒冷气候条件下的风电场是指存在结冰风险, 或者气温经常超出风力机工作温度的下限。加拿大魁北克省具有大量的风力资源, 2000年以来该省相继建设了多个风电场, 由于地理位置靠北, 经常遭遇风力机结冰事件。例如,

Murdochville风电场(见图1), 海拔高度850~950m, 由60台Vestas 1.8MW风力机组成。据当地气象站统计, 在2004-2005年的冬、春季, 发生结冰事件13起, 其中比较严重的有5起。为了有针对性地开展结冰研究, 研究人员开展了结冰气候条件参数搜集工作, 用于风力机设计和防冰研究, 主要包括: 液态水含量(LWC)、水滴中值体积直径(MVD)、风速、气温、持续时间等。

风力机地面结冰与飞机高空结冰气象条件不尽相同。风力机结冰主要是气温在冰点温度以下, 由冷冻的细雨、湿雪或结冰雾、云、霜等水汽凝结物沉积形成。结冰云是由水汽团冷凝和冰晶等大气悬浮物组成, 其中小水滴粒径一般小于 70° ; 雾通常在靠近海岸、湖泊或陆地潮湿空气地面遇冷凝结形成; 空气中的湿气冷凝碰到较冷的物体表面会形成露, 当在低于冷冻温度时, 露就在物面形成冰晶状, 即变成霜。

液态水含量和水滴中值体积直径是结冰气候条件的两个重要参数。低空云、雾中的液态水含量一般小于 0.3g/m^3 。水滴中值体积直径是一个代表性的数值, 该值将云雾中的小水滴分成数量相等的两部分。对积云和层云, 水滴中值体积直径一般在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 之间; 雾的水滴中值体积直径一般是 $15\sim 50\mu\text{m}$ 。研究表明, 地面常见结冰气象条件的典型水滴中值体积直径为 $25\mu\text{m}$ 左右。

图2给出了冻雨(或毛毛细雨)形成的过程。高空雨滴(直径 0.5mm , 最大约 $5\sim 6\text{mm}$)在下降过程中会破碎变小、温

收稿日期: 2015-12-18; 录用日期: 2016-01-20

*通讯作者. Tel.: 0816-2463358 E-mail: zpg63@163.com

引用格式: ZHAN Peiguo. Review of the wind turbine icing in overseas cold regions [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(02): 01-06. 战培国. 国外寒冷地区风力机结冰问题研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(02): 01-06.



图1 Murdochville风电场
Fig.1 Murdochville wind farm

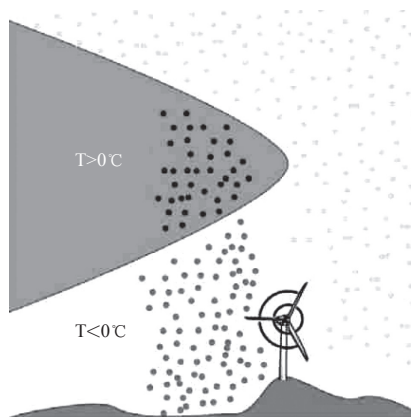


图2 结冰气象的形成
Fig.2 Formation of icing

度会下降到冰点以下,形成超冷小水滴。云雾中的小水滴仅在 -40°C 会自然冷冻,在 $0\sim-40^{\circ}\text{C}$ 之间时,是一种超冷的液态,需要长时间才能自然冷冻,当超冷水滴碰到物体,便会在物体表面结冰。毛毛毛细雨的水滴一般比较均匀,直径小于 0.5mm ,其典型的水滴中值体积直径为 250° 。降水强度用每小时毫米水柱表示, $1\text{mmH}_2\text{O}$ 为轻度, $6.5\text{mmH}_2\text{O}$ 为中度, 25

mmH_2O 为重度。液态水含量可用下式计算:

$$\text{LWC} = \frac{\rho_w P}{36 \times 10^5 v_{\text{term}}} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水的密度; v_{term} 为水滴近地速度, P 为降水强度。

1.2 结冰条件下风电场产能的评估

在寒冷气候条件下,结冰会对风力机运行产生很多影响,例如:测量仪器故障、机械故障、叶片空气动力失速、巡护安全问题和电场停产。加拿大的大多数风电场都会出现结冰情况,因此,需要开展结冰对风电场产能影响的评估,提高对寒冷地区风电场建设选址、风力机运行风险评估、防冰除冰技术发展的认识。

魁北克大学搜集了两个风电场4年的运行数据和相关气象资料开展了评估研究。其中,一个风电场共计23起结冰事件,累计308h;另一个风电场有19起结冰事件,累计213h;另外,约2%的情况下,风力机会关机。研究表明,在结冰事件中,风力机平均功率损失26%左右(见图3),极端情况下,有时可能损失80%以上,年平均能量损失范围766~24298kWh。从图3(a)可以看出,结冰影响可以分两个阶段:首先,结冰发生后,风力机功率逐步下降,在持续一段时间后,随着冰融化脱落,风力机恢复正常功率。需要指出的是,结冰对风电场产能评估,需要视具体风场环境情况而定,在建设评估时,需要考虑风力机结冰对产能和成本的影响。

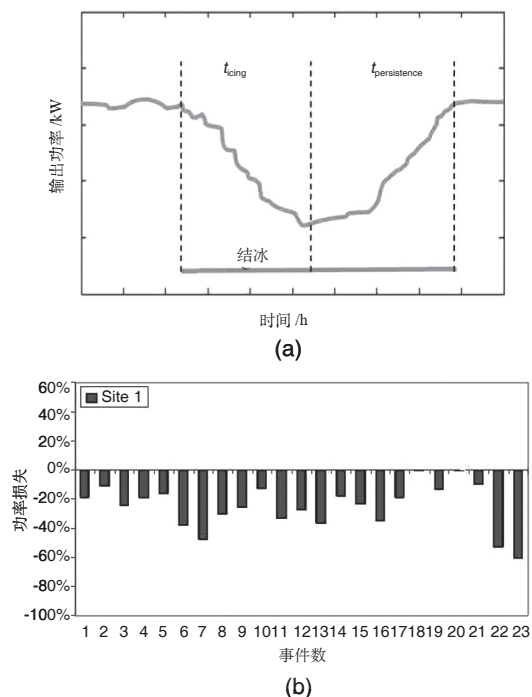


图3 结冰对风力机产能影响
Fig.3 Influence of icing to wind turbine capacity

2 风洞试验和数值计算研究

2.1 结冰风洞试验研究

结冰风洞是结冰研究的重要手段之一,风力机叶片结冰/防冰研究方法同飞机结冰研究方法类似。加拿大在魁北克大学防冰材料国际实验室开展了风力机结冰风洞试验研究,其结冰风洞试验段长1.5m,宽0.5m,高0.6m。根据野外实测的气象条件,建立结冰风洞模拟研究的环境条件,叶片模型以1.8MW/vestas-V80风力机为参考,叶片外段是NACA63XXX翼型,中段是FAA W3 XXX翼型,根段用的是NACA63 415翼型。风洞试验测量了两种典型结冰结果(霜冰、明冰)的结冰量、叶片结冰部位/形状、升力和阻力的变化,研究防冰除冰效率。

明冰研究对应的野外气象结冰条件是:LWC=0.218g/m³,温度-1.40℃,风速8.8m/s,持续时间6h。在这种条件下,叶片根部、中部和叶梢结冰特征都是明冰,冰密度917kg/m³。由于温度较高,小水滴撞击叶片前缘后,部分冻结,部分沿下表面向后流动,速度大时,上表面也有向后流动情况。根据风洞试验结冰测量推算,叶片全尺寸结冰量约709kg,占叶片净重量(6500kg)的11%。试验结果如图4所示。

霜冰研究对应的野外气象结冰条件是:LWC=0.242g/m³,

温度-5.70℃,风速4.2m/s,持续时间4.5h。在这种条件下,叶片根部、中部和叶梢结冰特征都是霜冰,冰密度850~900kg/m³。由于温度较低,小水滴撞击后直接冻结,在叶片的中段和叶梢,前缘结冰呈双角冰型形状,与小水滴撞击角等流动因素有关。根据风洞试验结冰测量推算,叶片全尺寸结冰量约434kg,占叶片净重量(6500kg)的6.7%。试验结果如图5所示。

两种情况的结冰量沿叶片展向分布是根端相对较少,中段以外相对较多。电热技术是最常用的除防冰技术,通常需要从叶片前缘沿下表面往后布置加热元,所需用电量约为风力机电能输出的2%~15%。为了减少电能消耗,需要进行风洞试验,研究加热元在叶片上的优化布局。

2.2 结冰的数值分析工具

在开展结冰机理研究、发展结冰模拟数值工具并应用于风力机结冰预测/防冰方面,加拿大有关科研院所开展大量工作。

理论研究主要包括:(1)气象条件,进行了近地面的结冰环境研究,如:云、雾、露、霜、湿雪、雨、冻雨形成及特性等。(2)水收集特性,如:小水滴与叶片撞击轨迹、叶片对小水滴的收集效率。(3)冰集聚的热量转换,如:冰集聚热力学、凝固热、绝热热、焓、对流热交换、蒸发和升华热、导热热、辐射

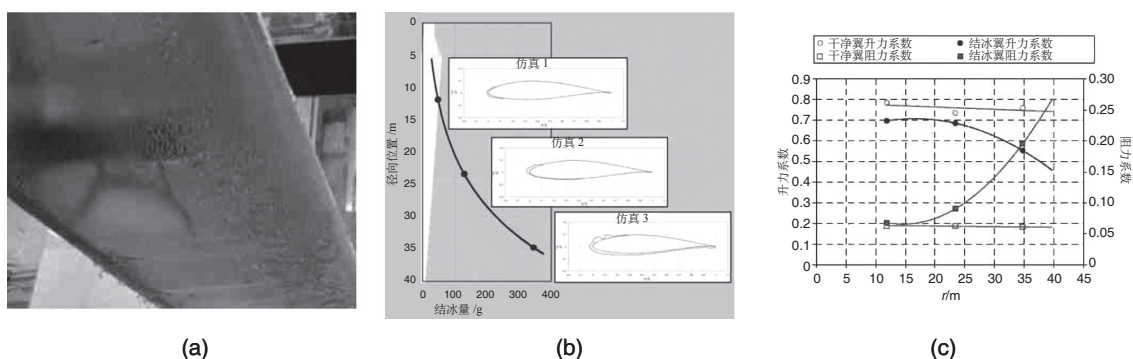


图4 明冰情况风洞试验结果

Fig.4 Results of wind tunnel test in clear ice

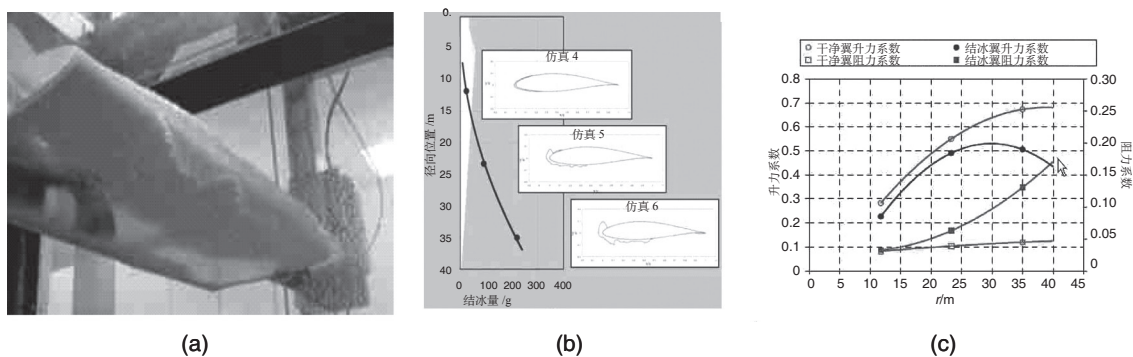


图5 霜冰情况的风洞试验结果

Fig.5 Results of wind tunnel test in rime ice

热、表面温度和冷冻率。(4)湿雪的冰集聚。(5)飞溅海浪水雾的冰集聚。(6)结冰的质量、厚度、形状等。(7)冰探测、防冰、除冰、冰脱落。(8)结冰对叶片气动力、扭矩等影响。

在二维模拟计算方面,加拿大国家科学与工程研究委员会(NSERC)资助合作开发有CANICE2D 结冰/防冰软件。近两年,在CANICE2D基础上,开发了雷诺平均的N-S方法(CANICE2D-NS),能够模拟长时间持续结冰的情况。此外,也有采用其他软件的计算研究,例如:意大利航空航天研究中心的CIRAAMIL等。图6给出了CANICE2D软件框图和算例验证。

在三维模拟计算方面,加拿大McGill大学采用FENSAP-ICE数值模拟系统对大型工业风力机进行了结冰评估并与实际情况进行了对比分析研究。首先,采用NREL UAE Phase VI (国家可再生能源实验室非定常气动力试验第6阶段)20kW风力机的实验数据对FENSAP-ICE数值模拟系统的模拟能力进行了验证;然后,以WindPACT 1.5MW风力机

为研究对象,进行了复杂气象条件下/长时间结冰(17h)案例的研究。

FENSAP-ICE数值模拟系统(见图7)包含气流、水滴撞击和冰集聚结算器。气流用雷诺平均N-S流动结算器计算;湍流范围用Spalart-Allmaras湍流模型获得;水滴分布和撞击模型用两相欧拉水滴结算器DROP3D计算;风力机叶片的冰集聚用浅表水结冰模型ICE3D计算,根据风力机叶片局部气流条件和内流气象条件,能够计算明冰或霜冰冰型;计算了不同结冰条件对风力机功率的影响并与风电场实测结果进行了对比。

3 风力机结冰研究取得的初步认知

对国内外风力机结冰研究现状进行归纳总结,得到以下几点结论:

(1)风力机结冰气候条件很复杂。同最初风力机叶片翼型研究借鉴航空翼型研究成果类似,风力机结冰研究也借

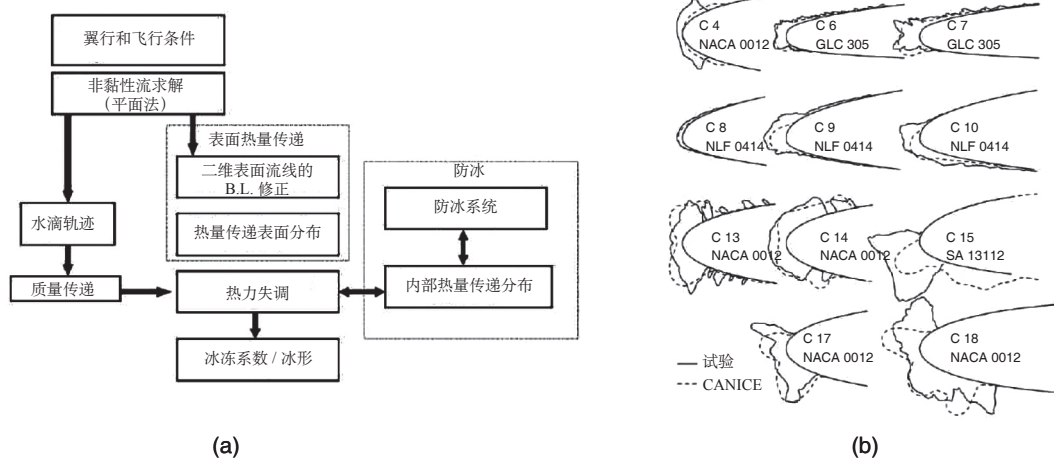


图6 CANICE2D 结冰/防冰软件结构及验证算例

Fig.6 Structure of CANICE2D icing/anti-icing software and validation example

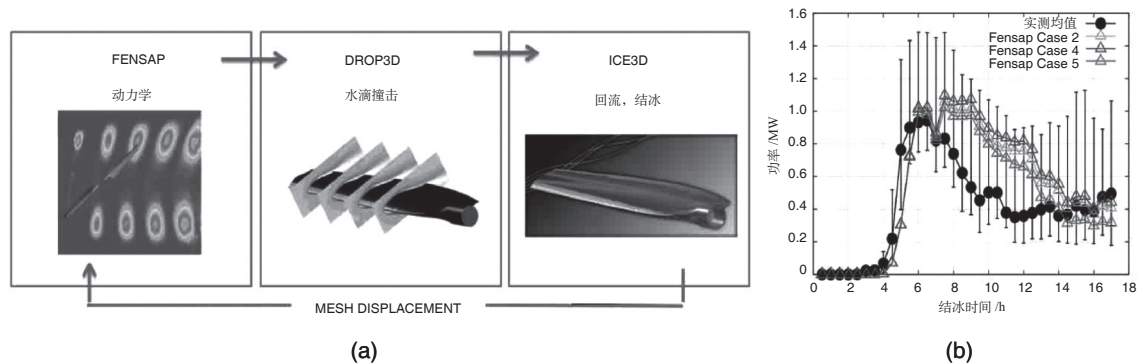


图7 FENSAP-ICE数值模拟系统

Fig.7 FENSAP-ICE numerical simulation system

鉴了航空研究的方法手段。风力机结冰气候包括当地气温、风速、雾、露、霜、湿雪、冻雨/雨/毛毛细雨、浪花水雾等，叶片上的冰集聚(低速撞击、长时间)与飞机上的冰集聚(高速撞击、较短时间)差别很大。在航空领域，飞机结冰研究比较成熟，国际上已经形成了用于运输机防冰设计和适航验证的标准气象参考条件；对风力机而言，结冰气候条件搜集研究还不多，国际上还未形成寒冷地区风力机设计气象参考条件标准。

(2)寒冷地区风力机结冰是一个严重问题，陆地风力机容易遭受冻雨、毛毛细雨、冻雾、结冰云(高海拔地区)、霜(近湖泊地区)引起的结冰袭击，海上风力机会遇到浪花飞溅冻水雾(一般高度小于16m)引起的结冰。

(3)转速低的大风力机相对转速高的小风力机更不容易结冰。叶片上冰集聚与水滴撞击速度有关，撞击速度高容易结冰；就同一叶片而言，中段和叶尖更容易结冰。

(4)明冰相比霜冰对叶片气动性能影响更大。霜冰增加了叶片表面粗糙度，但对翼型影响较小；而明冰相对光滑，但它在很大程度上改变了叶片翼型的形状。霜增加了叶片前缘粗糙度，对叶片气动特性影响较大。就目前而言，还缺乏霜、明冰、霜冰等更深刻的认知和足够的数据，因此，定量分析研究还有难度。

(5)实验和数值模拟是风力机性能研究的重要手段，其方法还有很大的改善空间。相对来说，干燥环境的结冰比潮湿环境的结冰预测评估要准确一些。冰角的位置/尺寸与冰的粗糙度和边界层边缘的速度密切相关。

(6)风力机冰防护系统研究尚处于起步阶段。风力机除冰比防冰更有效，但也更难实施。防冰一般采用电加热保持叶片表面温度在冷冻温度以上，据估算叶片叶梢前缘消耗的能量是根部前缘的3.5倍，叶片下表面消耗的能量是上表面的1.5倍。看上去防冰比除冰更有优势，但实际上叶片全表面防冰过于昂贵，是不现实的。除冰相对成本便宜，它允许在叶片上形成一定的结冰，当达到某一临界值时，启动除冰装置，然而，准确探测并合理确定这个启动值有难度。

4 结束语

世界范围内风力机应用日益普及，分布于寒冷地区的风电场也随之增多，结冰对风力机性能及风电场产能的影响受到关注，北欧、北美等风能利用发达国家较早地认识到

极端条件对风力机的影响，并开展了大量实测、风洞试验和数值模拟研究，取得了一定的研究成果。我国地域辽阔，温差气候变化大，地处高山、海岛、西北等地的风电场冬春季也会面临不同程度的结冰/霜问题。鉴于我国的风力发电起步较晚，对风力机极端气象条件的研究和认知相对薄弱，因此，学习和借鉴国外先进经验，加强风力机极端气候条件下的研究，将有利于我国风力机设计和制造技术的快速发展。

AST

参考文献

- [1] David Switchenko, Wagdi Habashi, Guido Baruzzi, et al. AIAA 2014-1399, FENSAP-ICE simulation of complex wind turbine icing events, and comparison to observed performance data[R]. 32nd ASME Wind Energy Symposium, 2014, AIAA 2014-1399.
- [2] Morteza Mohammadi, Dennis De Pauw, Moussa Tembely, et al., AIAA 2013-2486, Droplet impact and solidification on hydrophilic and superhydrophobic substrates in icing conditions[R]. 43rd Fluid Dynamics Conference, 2013.
- [3] K. Hasanzadeh, A. Mosahebi, E. Laurendeau, et al. AIAA 2013-2671, Validation and verification of multi-steps icing calculation using CANICE2D-NS code[R]. 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2013.
- [4] T.C.S. Rendall, C.B. Allen. Improved finite volume droplet trajectories for icing simulation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 58(1):185-194.
- [5] Clement Hochart, Guy Fortin, Jean Perron. AIAA 2007-1373, Icing simulation of wind turbine blades [R]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007.
- [6] Daniel Gillenwater, Christian Masson, Jean Perron. AIAA 2008-1344, Wind turbine performance during icing events[J]. AIAA Journal, 2008.
- [7] G. Fortin, J. Perron. AIAA 2009-274, Wind turbine icing and de-icing[R]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2009.

作者简介

战培国(1963—)男，硕士，高级工程师。主要研究方向：空气动力学。

Tel: 0816-2463358 E-mail: zpg63@163.com

Review of the Wind Turbine Icing in Overseas Cold Regions

ZHAN Peiguo*

China Aerodynamics Research and Development Center, CARI, Mianyang 621000, China

Abstract: Wind turbine icing events are one of the key factors to the productivity of wind farms in cold regions. On the basis of literature survey, reviewed the icing researches of Canada in cold region wind farms, including of icing climates, evaluation icing effects on wind farm productivity, wind turbine blade test in icing wind tunnels and numerical simulation codes. The primary knowledge about wind turbine icing in cold regions had been summed up. The purpose is to provide references for our national development in this field.

Key Words: wind turbine; icing; wind turbine blade icing; icing climate; wind farm

Received: 2015-12-18; **Accepted:** 2016-01-20

***Corresponding author. Tel. :** 0816-2463358 **E-mail:** zpg63@163.com