

风力机气动噪声研究现状与发展趋势*

李晓东, 许影博, 江 旻

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要: 首先介绍风力机气动噪声源的基本组成,然后对风力机气动噪声理论预测、实验测试和数值模拟方法进行阐述,重点论述这3类方法在风力机气动噪声研究中的应用现状,并讨论风力机气动噪声抑制技术,最后简要展望风力机气动噪声研究的发展趋势。

关键词: 风力机; 气动噪声; 气动噪声预测方法; 气动噪声抑制技术

中图分类号: TK83; O335 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.008

引 言

随着风能产业的快速发展,风电场距离居民区越来越近,风力机尺寸越来越大,风力机气动噪声问题日益凸显,在国外已经引起了一些环保组织的关注,并陆续收到来自风电场附近居民的投诉。为此,各国都相继制定了对风力机气动噪声进行严格限制的条例。风力机气动噪声问题已成为目前限制风力机发展的主要因素之一,因此亟待发展有效的风力机气动噪声抑制技术。然而,目前风力机气动噪声产生机理还有诸多地方不清楚,精确预测尚有很大难度,噪声抑制技术在理论指导方面还比较匮乏。因此,对风力机气动噪声产生机理进行研究,发展精确的气动噪声预测和高效的气动噪声抑制技术,成为目前学术界和工业界关注的热点问题。

1 风力机气动噪声源

风力机气动噪声是由风力机叶片与远前方空气来流相互作用产生的,根据产生原因的不同大致可分为三大类^[1]:(a) 低频噪声,其包括由叶片或升力面旋转产生的定常载荷噪声和由叶片通过流动的局部亏损区域或尾流区产生的非定常载荷噪声。(b) 来流湍流干扰噪声。它是由来流湍流与叶片干涉产生的宽带噪声,由于来流空气的不稳定而难于定量。(c) 叶片自噪声。它是由空气沿叶片表面流动产生的,这种噪声具有典型的宽带特性,但是叶片的钝尾缘、缝隙和小孔等部分也会产生纯音分量。

叶片自噪声主要包括(1) 尾缘噪声:由湍流边界层和尾缘相互作用产生,该部分噪声以宽频为主;(2) 叶尖噪声:由叶尖湍流和叶尖表面作用产生,该部分噪声特性还有待研究;(3) 分离噪声:由湍流与叶片相互作用产生,该部分噪声以宽频为主;(4) 层流边界层噪声:由边界层

* 收稿日期: 2013-04-16; 修订日期: 2013-09-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2007CB714604)

作者简介: 李晓东(1967—),男,江苏人,教授(通讯作者。Tel: +86-10-82338579;

E-mail: lixd@buaa.edu.cn)。

与叶片之间的非线性相互作用产生,该部分噪声以纯音为主;(5) 钝尾缘噪声:由钝尾缘的涡脱落产生,该部分噪声以纯音为主;(6) 小孔和缝隙等部位产生的噪声:由非定常剪切流流经小孔和缝隙所产生,该部分噪声主要以纯音为主。

2 风力机气动噪声理论预测

风力机气动噪声理论预测方法主要包括:理论模型预测和半经验公式预测。理论模型是建在解析求解风力机绕流流场和声场的基础上的,因此在保持基本物理规律不变的前提下,大部分理论模型都做了或多或少的假设,以便能够获得相应的解析解。半经验公式是建立在实验测量基础上,通过大量的实验数据和理论分析,找出其基本规律,并将实验数据进行曲线拟合或相关分析得到相应的经验公式预测模型。

1) 理论模型

Ffowcs Williams, Hall^[2] 基于 Lighthill 理论^[3] 通过引入四极子声源假设,并采用半平面 Green 函数求解 Lighthill 方程得到了半无限长、零厚度平板尾缘噪声模型。Crighton^[4] 将尾缘噪声模化成一系列涡通过半无限长平板边缘,同样也得到了相应的理论预测模型。Amiet^[5] 把远声场压力的统计信息直接跟尾缘上游一段距离处的壁面气动压力相关联。Howe^[6] 于 2001 年通过求解有限弦长的 Green 函数得到了低 Mach 数下的尾缘噪声模型。为避免求解 Green 函数,Amiet^[5] 假设叶片表面沿上游方向无限长,通过求解等价波的散射问题从入射壁面压力波出发得到了辐射声场。Roger, Moreau^[7] 于 2004 年通过对 Amiet^[5] 中辐射积分参数修正,得到了低 Mach 数、忽略对流对声辐射影响并可以考虑叶片前缘后散射影响的尾缘噪声模型。

2) 半经验公式

半经验公式在预测叶片自噪声方面典型的代表是 Brooks, Pope^[8] 基于 Ffowcs Williams, Hall^[2] 和 Amiet^[9] 理论,给出的翼型自噪声 5 种半经验关系的数学描述。Paterson 等^[10] 通过对 NACA 0012 翼型的绕流发声问题实验,得到了其频率与来流速度的经验关系式。Fink^[11] 在大量实验结果相关分析的基础上,给出了预测叶片尾缘噪声的半经验公式。Glegg 等^[12] 通过对风力宽频噪声的测量,提出了风力机宽频噪声预测方法。Zhu 等^[13] 在翼尖区域采用了一种新的翼尖修正技术,提高了预测翼尖涡噪声的准确性。

对于整机的半经验预测公式, Grosveld^[14] 提出了一种可以考虑包括来流湍流干扰、湍流边界层和钝尾缘尾迹等噪声源的轴流式风力机宽频噪声预测方法,并把该方法应用于真实风力机的气动噪声预测,预测结果与 MOD-OA, MOD-2, WTS-4 等风力机实验数据吻合得较好。Kim 等^[15] 进一步发展了风力机气动噪声预测方法,把非线性梁理论引入到风力机气动噪声预测方法中,从而可以考虑流固耦合作用下的轴流式风力机气动噪声。李应龙等^[16] 利用半经验公式对型号为 AOC-15/50 的风力机进行了噪声研究。

尽管风力机气动噪声理论预测方法可以快速地对风力机气动噪声进行评估,在工程界得到了广泛的应用,但是由于目前理论预测存在大量的假设,并且理论预测方法无法对声源细节进行刻画,无法对复杂真实风力机气动噪声给出定量的预测,对风力机低噪声设计也无法实现。

3 风力机气动噪声实验测试

风力机气动噪声的实验研究方法主要包括:流场测量、声源定位和声场测量。流场测量主要包括:毕托管(Pitot tube)测速、热线/热膜测速、激光多普勒(laser Doppler velocimeter, LDV)

及其相关技术测速和粒子成像 (particle image velocimetry, PIV) 及其相关技术测试,其中,毕托管和热线/热膜测速都要在流场中引入测试部件,在测量时仪器本身会对流场产生影响,激光 Doppler 是利用运动介质对激光的反射、折射和透射特性来实现流场测量的,不会在流场内引入额外的部件,测量精度较高,但是受到激光器频差的影响,无法对高速运动介质进行测量。粒子成像测速技术是通过向流场内散布示踪粒子,实现空间流场结构和流动特性测量,该方法在流场内不会引入额外部件,可以真实反映流场运动特性。声源定位是基于传声器阵列利用波束成形算法,实现声源频率、位置和能量信息的重构。声场测量主要是利用传声器在不同空间位置对风力机气动噪声进行测量研究其声源特性。

对于风力机叶片自噪声的研究,20 世纪 70 年代, Tam^[17] 通过对大量实验数据的分析,认为风力机翼型尾缘噪声有声学反馈环的机制,这些反馈环导致了多个单频峰值的产生。反馈环有许多种形式,一种被大多数学者认可的形式是声波在尾缘产生向上游传播激发边界层的扰动,产生 T-S 波, T-S 波在尾缘部分向外辐射,产生了单频峰值。Paterson 等^[10] 通过远声场传声器测量,对低湍流度来流下的翼型涡脱落噪声进行实验研究,发现涡脱落噪声以离散的单频噪声为主。Roger, Moreau^[18] 和 Arbey, Bataille^[19] 通过远声场传声器测量对翼型尾缘气动噪声进行研究,发现尾缘噪声受到雷诺数 (Reynolds number)、攻角和尾缘突变的影响,例如在高雷诺数 ($>10^6$) 时尾缘噪声具有宽频特性,当来流为二维流动并且在低雷诺数时,尾缘噪声具有窄带特性,在频谱上会有一些高幅值的单频峰值出现,这些噪声是由于边界层的不稳定性 (例如 T-S 波),并不断发展在尾缘部分以噪声的形式向外辐射。Brooks 等^[8] 利用多点传声器测量的方法对翼型气动噪声进行了研究,发现翼型气动噪声以宽频噪声为主,并伴有纯音出现。Moroz^[20] 利用传声器对 7.6 m 风轮直径的风力机进行远声场测量,发现叶片钝尾缘可以产生纯音噪声。Oerlemans 等^[21] 利用传声器阵列技术对直径 58 m 的三叶片风力机进行了噪声源特性研究,发现尾缘的宽频噪声是风力机的主要噪声源。Kameier, Neise^[22-23] 通过测量发现旋转的不稳定性对叶尖间隙流的噪声产生有明显影响。Jacob 等^[24] 对叶尖流流过静止翼型叶尖所产生的气动噪声进行了近声场和远声场测量。汪建文等^[25] 对小型风力机风轮叶尖近尾迹区域声辐射进行实验研究,发现风轮旋转过程中风力机叶尖辐射噪声频谱是由旋转风轮的基频及其谐波所构成的离散噪声叠加在宽频噪声上组成的。

对于风力机叶片来流湍流干扰噪声的研究, Marcus, Harris^[26] 通过试验研究了轴流式风力机叶片和塔架的干涉气动噪声,发现叶片与塔架的干涉噪声有脉冲特点,并且噪声与叶片的旋转速度、塔架的阻力系数相关。Jacob 等^[27] 利用 PIV 技术测量了圆柱/NACA 0012 翼型非定常干涉流场,并测量了其远声场,发现涡与翼型前缘的相互作用是圆柱/翼型干涉流动的主要特征,形成了主要的噪声源区。Rogers, Omer^[28] 研究了来流湍流度对小尺寸轴流风力机气动噪声的影响,发现随着来流湍流度的增加,风力机气动噪声明显增加。

对于风力机低频气动噪声的研究, Jakobsen^[29] 通过测量对风力机低频噪声进行了进一步研究,发现顺风叶轮风力机由于塔架脱落涡与风轮相互作用会形成比较强的低频噪声,说明了叶片扫过塔架尾迹区会形成低频噪声。随后, Leventhall^[30] 也对风力机低频噪声进行研究,同样发现塔架尾迹与风轮的干涉是风力机的主要低频噪声源。Jung 等^[31] 对大尺寸风力机辐射的次声和低频噪声进行研究,发现随着风力机尺寸的增加,风力机的低频噪声也会随之增加。

目前,对于开展全尺寸的风力机实验还存在着一定的难度,随着风力机尺寸的增大,风力机气动噪声的测试环境将更加复杂,风力机的机械噪声与气动噪声相互叠加,进一步加大了风力机气动噪声测量的难度。

4 风力机气动噪声数值模拟

风力机气动噪声数值模拟策略主要包括混合计算和直接计算两种.混合计算是将流场计算和声场模拟分离开来,首先通过数值模拟得到声源区的流场信息,包括诸如壁面载荷、湍流脉动等信息,然后将近场声源区的的信息作为声场计算的输入,再通过解析或者数值的方法计算声传播特性.近场区的流场模拟可以采用非定常雷诺平均 N-S (unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes, URANS)、大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 等.远声场声传播特性既可以通过求解 FW-H 方程^[32], Kirchhoff 积分^[33] 等理论方程,也可以在更大的计算域内采用较疏的网格数值求解线性化 Euler 方程或波动方程的方法获得.混合方法克服了半经验公式和理论模型在预测过程中的引入的过多简化,求解模型更接近于物理实际,因此,可以用于研究噪声的产生机理,并快速地获得其远声场特性.

直接计算是采用高精度计算气动声学 (computational aeroacoustics, CAA) 方法求解可压缩 Navier-Stokes 方程获得流场声场统一解,以研究声波的产生和传播过程.由于直接计算是从最基本的流动控制方程出发,不依赖于任何带有或多或少简化的声源模型,因此可以精确刻画噪声的产生和传播过程,并且考虑声波在传播过程中流场和声场之间的相互影响.

针对风力机叶片自噪声,2000 年 Singer 等^[34] 利用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法获得翼型附近的流场信息作为输入,通过 FW-H 积分研究翼型尾缘噪声的声学特性,Lummer 等^[35] 研究了翼型尾缘涡脱落与尾缘的相互作用,发现非线性涡与尾缘作用强度要高于线性涡,Jiang 等^[36-37] 利用 CAA 方法对翼型自噪声进行了高阶精度数值模拟研究,发现随着翼型攻角的增加,纯音分量向低频移动并最终呈宽频化特征.Fleig, Arakawa^[38] 开展了风力机叶尖噪声的数值模拟研究,运用大涡模拟方法 (LES) 模拟了 MEL III 风力机的叶片绕流流场,并利用 FW-H 积分给出了风轮的远场宽带噪声预测.Marsden 等^[39] 和 Iida 等^[40] 也对风力机叶尖涡宽频噪声进行了研究.

对于来流湍流干扰噪声的研究,2004 年 Morris 等^[41] 开展了风力机叶片气动噪声的计算气动声学 (CAA) 方法分析,研究了阵风来流、大气湍流和风切变等因素对噪声的影响.Jacob 等^[27] 和 Greschner 等^[42] 通过在翼型的上游放置圆柱,来模拟来流湍流与叶片相互作用所产生的噪声,分别利用雷诺平均 N-S (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS) 方程方法、大涡模拟方法和脱体涡模拟 (detached eddy simulation, DES) 方法模拟了圆柱/NACA 0012 翼型干涉非定常干涉流场,进一步通过 FW-H 方程对圆柱/翼型干涉噪声进行了计算,其结果表明,脱体涡模拟方法与 FW-H 方程结合的气动声学模拟方法能很好地给出复杂流动宽频辐射噪声预测.此外,江旻等^[43] 等也利用数值模拟对翼型与来流相互作用产生的噪声进行了研究.对于整机气动噪声的研究,Tadamasa, Zangeneh^[44] 利用 CFD 软件和 FW-H 方程相结合的方式对轴流式风力机气动噪声远声场进行了研究.

数值方法可以精确地刻画声源细节,但是由于气动噪声问题对网格尺度的要求高,使得多尺度问题计算量极大,因此在对多尺度问题的计算上还存在一定的难度,随着计算方法改进以及计算机运算速度的提升,数值模拟将成为风力机气动噪声研究的重要手段.

5 风力机气动噪声抑制技术

风力机气动噪声抑制技术一直贯穿于风力机气动噪声研究过程中.1972 年 Roger, Robert^[45] 对叶片前缘安装锯齿结构下的气动噪声进行了研究.Bohn^[46] 在翼型表面开微孔,并对声

场进行测量,发现翼型壁面微孔对于某些频率段的噪声具有明显抑制作用.Geyer 等^[47]利用麦克风阵列研究了翼型壁面铺设多孔材料对翼型气动噪声影响,发现壁面多孔材料对翼型尾缘噪声有明显抑制作用.Fink 等^[48]所做的风洞试验以及欧洲的 RAIN(reduction of airframe and installation noise)研究项目都证明了流动可穿透性尾缘延伸段,如有毛孔或气孔的尾缘、刷子和锯齿型尾缘等是降低尾缘噪声有效的方法.Howe^[49]给出了锯齿尾缘翼型的噪声预测公式.Chong 等^[50]研究了有厚度的翼型尾缘锯齿对翼型气动噪声的影响,发现有厚度的尾缘锯齿降噪效果要优于平板锯齿尾缘.许影博和李晓东等^[51-52]对安装平板锯齿和刷毛尾缘的翼型气动噪声进行研究,发现锯齿尾缘和刷毛尾缘都有比较明显降噪效果.Glezer^[53]在轴流风力机叶片壁面上引入射流来抑制叶片失速,从而降低噪声.Greenblatt 等^[54]通过在轴流风力机叶片前缘安装等离子激励器抑制流动分离的方式来降低风力机气动噪声。

风力机气动噪声抑制方法强烈依赖于风力机气动噪声发声机理的研究,目前风力机气动噪声的发声机理还不够明确,高效的噪声抑制方法还有待进一步研究。

6 小结和展望

论文综述了风力机气动噪声的研究现状,介绍了风力机气动噪声的主要分量,重点阐述了理论预测、实验测试和数值模拟 3 种方法在风力机气动噪声研究中的应用和存在的问题,并分析了风力机气动噪声抑制技术的现状和存在的不足。

已有风力机气动噪声的研究主要是针对中小尺寸风力机展开的,气动噪声特性主要以中高频为主,随着风力机尺寸的不断增大,未来大型风力机低频气动噪声将变得越来越显著,因此亟需开展风力机低频气动噪声机理和抑制技术研究,提出适用于风力机低频气动噪声研究的理论预测、实验测试和数值模拟研究方法,发展高效的风力机低频气动噪声抑制技术。

参考文献(References):

- [1] Wagner S, Bareib R, Guidati G. *Wind Turbine Noise*[M]. Berlin: Springer, 1996: 200-210.
- [2] Ffowcs Williams J E, Hall L H. Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, **40**(4): 657-670.
- [3] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically—I: general theory[J]. *Mathematical and Physical Sciences*, 1952, **211**(1107): 564-587.
- [4] Crighton D G. Radiation from vortex filament motion near a half-plane[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, **51**(2): 357-362.
- [5] Amiet R K. Noise due to turbulent flow past a trailing edge[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, **47**(3): 387-393.
- [6] Howe M S. Edge-source acoustic Green's function for an airfoil of arbitrary chord with application to trailing-edge noise[J]. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 2001, **54**(1): 139-155.
- [7] Roger M, Moreau S. Broadband self-noise from loaded fan blades[J]. *AIAA Journal*, 2004, **42**(3): 536-544.
- [8] Brooks T F, Pope D S, Marcolini M A. Airfoil self-noise and prediction[R]. NASA-RP-1218, 1989.
- [9] Amiet R. Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream[J]. *Journal of Sound Vibration*, 1975, **41**(4): 407-420.
- [10] Paterson R W, Vogt P G, Fink M R, Munch C L. Vortex noise of isolated airfoils[J]. *Journal*

- of Aircraft*, 1973, **10**(5): 296-302.
- [11] Fink M R. Noise component method for airframe noise[J]. *Journal of Aircraft*, 1979, **16**(10): 659-655.
- [12] Glegg S A L, Baxter S M, Glendenning A G. The prediction of broadband noise from wind turbines[J]. *Journal of Sound Vibration*, 1986, **118**(2): 217-239.
- [13] Zhu W J, Heilskov N, Shen W Z. Modeling of aerodynamically generated noise from wind turbines[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, **127**(4): 517-528.
- [14] Grosveld F W. Prediction of broadband noise from horizontal axis wind turbines[J]. *Journal of Propulsion*, 1985, **1**(4): 292-299.
- [15] Kim H, Lee S, Son E, Lee S, Lee S. Aerodynamic noise analysis of large horizontal axis wind turbines considering fluid-structure interaction[J]. *Renewable Energy*, 2012, **42**: 46-53.
- [16] 李应龙, 欧阳华, 竺晓程, 田杰, 杜朝辉. 基于半经验公式的水平轴风力机气动噪声预测[J]. 能源技术, 2010, **31**(3): 152-158. (LI Ying-long, OUYANG hua, ZHU Xiao-cheng, TIAN Jie, DU Zhao-hui. The aerodynamic noise prediction of HAWT based on semi-empirical equations[J]. *Energy Technology*, 2010, **31**(3): 152-158. (in Chinese))
- [17] Tam C K W. Discrete tones of isolated airfoils[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, **55**(6): 1173-1177.
- [18] Roger M, Moreau S. Broadband self-noise from loaded fan blades[J]. *AIAA Journal*, 2004, **42**(3): 536-544.
- [19] Arbey H, Bataille J. Noise generated by airfoil profiles placed in a uniform laminar flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, **134**: 33-47.
- [20] Moroz E. Experimental and theoretical characterization of acoustic noise from a 7.6 m diameter teetered rotor wind turbine[R]. AIAA paper 98-0038, 1998.
- [21] Oerlemans S, Sijtsma P, Mendez L B. Location and quantification of noise sources on a wind turbine[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, **299**(4): 869-883.
- [22] Kameier F, Neise W. Rotating blade flow instability as a source of noise in axial turbomachines[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, **203**(5): 833-853.
- [23] Kameier F, Neise W. Experimental study of tip clearance losses and noise in axial turbomachines and their reduction[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, **119**(3): 460-471.
- [24] Jacob M C, Grilliat J, Camussi R, Caputi G G. Aeroacoustic investigation of a single airfoil tip leakage flow[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2010, **9**(3): 253-272.
- [25] 汪建文, 白杨, 高志鹰, 东雪青, 王晓迪, 由志刚. 小型风力机风轮叶尖近尾迹区域声辐射测试与分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2010, **32**(1): 27-31. (WANG Jian-wen, BAI Yang, GAO Zhi-ying, DONG Xue-qin, WANG Xiao-di, YOU Zhi-gang. Measurement and analysis on noise radiation in rotor blade-tip near-wake region of small windmill[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2010, **32**(1): 27-31. (in Chinese))
- [26] Marcus E N, Harris W. An experimental study of wind turbine noise from blade-tower wake interaction[R]. AIAA paper 83-0691, 1983.
- [27] Jacob M C, Jerome B, Casalino D, Marc M. A rod-airfoil experiment as benchmark for broadband noise modeling[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2005, **19**(3): 171-196.
- [28] Rogers T, Omer S. The effect of turbulence on noise emissions from a micro-scale horizontal axis wind turbine[J]. *Renewable Energy*, 2012, **41**: 180-184.
- [29] Jakobsen J. Infrasound emission from wind turbines[J]. *Journal of Low Frequency Noise*,

- Vibration and Active Control*, 2005, **24**(3): 145-155.
- [30] Leventhall G. Infrasound from wind turbines-fact, fiction or deception[J]. *Canadian Acoustics*, 2006, **34**(2): 29-34.
- [31] Jung S S, Cheung W S, Cheong C L, Shin S H. Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2008, **53**(4): 1897-1905.
- [32] Brentner K S, Farassat F. An analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for moving surfaces[J]. *AIAA Journal*, 1998, **36**(8): 1379-1386.
- [33] Farassat F, Myers M. Extension of Kirchhoff's formula to radiation from moving surface[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, **123**(3): 451-460.
- [34] Singer B A, Brentner K S, Lockard D P. Simulation of acoustic scattering from a trailing edge [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, **230**(3): 544-560.
- [35] Lummer M, Delfs J W, Lauke T. Simulation of sound generation by vortices passing the trailing edge of airfoils[R]. AIAA paper 2002-2578, 2002.
- [36] JIANG Min, LI Xiao-dong, LIN Da-kai. Numerical simulation on the airfoil self-noise at low Mach number flows[R]. AIAA paper 2012-0834, 2012.
- [37] JIANG Min, LI Xiao-dong, BAI Bao-hong, LIN Da-kai. Numerical simulation on the NACA0018 airfoil self-noise generation[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2012, **2**(5): 052004.
- [38] Fleig O, Arakawa C. Numerical simulation of wind turbine tip noise[R]. AIAA paper 2004-1190, 2004.
- [39] Marsden O, Bogey C, Bailly C. Noise radiated by a high-Reynolds-number 3-D airfoil[R]. AIAA paper 2005-2817, 2005.
- [40] Iida M, Fleig O, Arakawa C, Shimooka M. Wind turbine flow and noise prediction by large-eddy simulation[R]. AIAA paper 2005-1188, 2005.
- [41] Morris P J, Long L N, Brentner K S. An aeroacoustic analysis of wind turbines[R]. AIAA paper 2004-1184, 2004.
- [42] Greschner B, Thiele F, Jacob M C, Casalino D. Prediction of sound generated by a rod-airfoil configuration using EASM DES and the generalized Lighthill/FW-H analogy[J]. *Computers & Fluids*, 2008, **37**(4): 402-413.
- [43] 江旻, 李晓东, 周家检. 翼型绕流干涉噪声的实验与数值研究[J]. *应用数学和力学*, 2011, **32**(6): 718-729. (JIANG Min, LI Xiao-dong, ZHOU Jia-jian. Experimental and numerical investigation on sound generation from airfoil-flow interaction[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(6): 718-729. (in Chinese))
- [44] Tadamasa A, Zangeneh M. Numerical prediction of wind turbine noise[J]. *Renewable Energy*, 2011, **36**: 1902-1912.
- [45] Roger E A, Robert T N. Effect of leading edge serrations on noise radiation from a model rotor[R]. AIAA paper 72-655, 1972.
- [46] Bohn A J. Edge noise attenuation by porous-edge extensions[R]. AIAA paper 76-80, 1976.
- [47] Geyer T, Sarradj E, Fritzsche C. Porous airfoils: noise reduction and boundary layer effects [R]. AIAA paper 2009-3392, 2009.
- [48] Fink M R, Bailey D A. Model tests of airframe noise reduction concepts[R]. AIAA paper 80-0979, 1980.
- [49] Howe M S. Noise produced by a sawtooth trailing edge[J]. *Journal of Acoustical Society of*

- America*, 1991, **90**(1): 482-487.
- [50] Chong T P, Joseph P E, Gruber M. Airfoil self-noise reduction by non-flat plate type trailing edge serrations[J]. *Applied Acoustics*, 2013, **74**(4): 607-613.
- [51] 许影博, 李晓东. 锯齿型翼型尾缘噪声控制实验研究[J]. 空气动力学报, 2012, **30**(1): 120-124. (XU Ying-bo, LI Xiao-dong. An experiment study of the serrated trailing edge noise[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, **30**(1): 120-124. (in Chinese))
- [52] 许影博, 李晓东, 何敬玉. 刷毛翼型尾缘噪声控制实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, **43**(5): 612-616. (XU Ying-bo, LI Xiao-dong, HE Jing-yu. Experiment on noise control of trailing edge brushes[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, **43**(5): 612-616. (in Chinese))
- [53] Glezer A. Some aspects of aerodynamic flow control using synthetic-jet actuation[J]. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, **369**(1940): 1476-1494.
- [54] Greenblatt D, Harav A B, Schulman M. Dynamic stall control on a vertical axis wind turbine using plasma actuators[R]. AIAA paper 2012-0233, 2012.

Research Status and Trend of Wind Turbine Aerodynamic Noise

LI Xiao-dong, XU Ying-bo, JIANG Min

(School of Jet Propulsion, Beihang University (BUAA), Beijing 100191, P.R.China)

Abstract: The main components of wind turbine aerodynamic noise were introduced firstly. Then a detailed review was addressed about the theoretical prediction, experimental measurement and numerical simulation methods of wind turbine noise, with specific attention to the application aspect. Furthermore, suppression techniques for wind turbine aerodynamic noise were discussed. And the perspective of future research on wind turbine aerodynamic noise was presented finally.

Key words: wind turbine; aerodynamic noise; aerodynamic noise prediction method; suppression techniques of aerodynamic noise

Foundation item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB714604)