

FENGLIJI YEPIAN

QIDONG ZAOSHENG TEXING YU JIANGZAO FANGFA YANJIU

风力机叶片

气动噪声特性与降噪方法研究

胡 昊◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风力机叶片

气动噪声特性与降噪方法研究

胡 昊◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本著作采用经验模型(BPM)方法和计算流体力学结合声类比(CFD/FW-H)方法,首先研究了典型风力机翼型的气动噪声特性,提出了基于涡发生器的降噪方法;针对某兆瓦级风电机组叶片,研究其不同风速条件下、不同展向位置处的气动噪声特性,探索了基于涡发生器的风力机叶片降噪方法。本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作,可供相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

风力机叶片气动噪声特性与降噪方法研究 / 胡昊著
— 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 10
ISBN 978-7-5170-4665-3

I. ①风… II. ①胡… III. ①风力发电机—叶片振动—气动噪声—降噪措施—研究 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第207802号

责任编辑:杨庆川 陈 洁 封面设计:马静静

书 名	风力机叶片气动噪声特性与降噪方法研究 FENGLIJI YEPIAN QI-DONG ZAOSHENG TEXING YU JIANGZAO FANGFA YANJIU
作 者	胡 昊 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)、82562819(万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京厚诚则铭印刷科技有限公司
印 刷	三河市佳星印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 16.75印张 207千字
版 次	2016年10月第1版 2016年10月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	50.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着风电机组的大型化与风电场的大规模建设,风电机组对环境的影响成为人们普遍关注的问题。风电机组叶片的气动噪声是其中较为突出的问题之一。风电机组叶片气动噪声的产生机理与降噪方法成为风力机叶片研究中的热点。研究工作围绕上述两个热点问题展开,采用经验模型(BPM)方法和计算流体力学结合声类比(CFD/FW-H)方法,首先研究了典型风力机翼型的气动噪声特性,提出了基于涡发生器的降噪方法;针对某兆瓦级风电机组叶片,研究其不同风速条件下、不同展向位置处的气动噪声特性,探索了基于涡发生器的风力机叶片降噪方法。

以 DU97-W-300-flatback 钝尾缘风力机翼型为研究对象,分别采用 BPM 和 CFD/FW-H 方法模拟了翼型气动噪声特性,通过将计算值与实验值进行比较,验证了 BPM 模型和 CFD/FW-H 模拟结果的可信度。CFD/FW-H 计算结果与 BPM 计算结果在高频区较接近,且均与实验值吻合较好,但在低频区 CFD/FW-H 计算结果优于 BPM 计算结果。比较了不同湍流计算方法(URANS、DES、LES)对 CFD/FW-H 模拟结果的影响。研究发现,三种湍流计算方法得到翼型声压级的主频基本一致,主频所对应的声压级大小也基本一致。计算所得主频比实验主频略低,但声压级的峰值相近。同套网格情况下,三种计算方法中,URANS 计算结果与 DES 计算结果基本相同,但 DES 计算结果更加接近实验值。流场中声压的变化与压力的变化是密不可分的,脉动声压与脉动压力得到的主频及高阶谐波频率基本一致。在翼型尾缘下游沿流向不同位置处,声压频谱的主频基本一致。

在验证与确认的基础上,以 DU97-W-300-flatback 和 DU97-W-300 风力机翼型为研究对象,采用 CFD/FW-H 方法,研究了来流攻角和翼型尾缘厚度对翼型气动噪声特性的影响,揭示了大钝尾缘翼型气动噪声与尾缘脱落涡之间的关系。研究发现,翼型气动噪声声压级并不随攻角单调变化,而是呈先减小后增加的变化趋势。翼型总声压级随着半径距离的增加而逐渐减小,在不同半径距离处,翼型噪声的指向性分布均呈明显的偶极子形状。翼型尾缘噪声明显要大于前缘噪声,且前缘及尾缘噪声均小于翼型上下表面噪声。小攻角时,翼型噪声指向性在翼型上下表面的分布基本沿弦线对称;大攻角时,基本沿来流对称分布。常规翼型在小攻角时,声压级分布呈现低频特性;大攻角时,呈现宽频特性。钝尾缘翼型声压级分布均呈现出低频特性。钝尾缘翼型在较小攻角时,其声压级大于常规翼型;在大攻角时,两者相差较小。

其次,研究了采用三角形涡发生器降低气动噪声的方法。以上述两个典型风力机翼型为对象,采用 CFD/FW-H 方法,揭示了涡发生器降噪机理,得到了涡发生器产生集中涡与分离旋涡的干涉流场,以及集中涡涡流噪声与分离旋涡噪声对叶片及翼型气动噪声的影响规律。研究发现,涡发生器在不同攻角下对翼型噪声的影响规律略有不同。在小攻角时,涡发生器能降低翼型气动噪声;在较大攻角时,涡发生器也能降低翼型气动噪声;但在某些中间攻角时,涡发生器反而会增加翼型气动噪声。对于洁净翼型,小攻角时,翼型的噪声特性呈现低频特性,而较大攻角时呈现出宽频特性。对于带涡发生器翼型,在所有攻角下,翼型噪声分布均呈现低频特性。

最后,以某兆瓦级风力机叶片为研究对象,采用 CFD/FW-H 方法,研究了该叶片 5 个叶展位置处翼型的气动噪声特性和整个风轮的三维气动噪声特性。研究发现,翼型厚度越大声压级越大。但翼型失速之后,声压级大小与翼型厚度相关性不大。对于某个特定翼型,其噪声强度并不随攻角呈线性变化,得出了翼型气动噪声随攻角的变化规律与翼型升阻比的变化规律密切相关。

对于三维叶片噪声的指向性分布,在内叶展,叶片前缘、尾缘处的声压级大于叶片上下表面处声压级。在叶片的前缘、尾缘处,噪声呈现明显的宽频特性;在叶片的上下表面,噪声呈现出低频特性;在外叶展,噪声的指向性分布与孤立翼型类似,即为典型的偶极子分布。在叶片前缘、尾缘处声压级小于叶片上下表面声压级。越靠近外叶展,噪声呈现出宽频特性。在此基础之上,研究了不同风速条件下,在内叶展布置三种涡发生器结构(三角形、梯形、矩形)对叶片气动噪声的影响。研究发现,三种涡发生器均能推迟流动分离,提高叶片气动性能;矩形涡发生器会增加叶片气动噪声,梯形及三角形涡发生器均会降低叶片气动噪声,三角形涡发生器使叶片气动噪声降低最多。三角形涡发生器降噪效果最优。

由于作者水平有限,加之时间仓促,错误在所难免,敬请各位专家学者批评指正。

作 者

2016 年 7 月

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国风电发展概况	1
1.2 选题背景及研究现状	4
1.2.1 选题背景	4
1.2.2 叶片气动噪声研究现状	6
1.2.3 叶片降噪方法研究现状	17
1.3 研究内容与本书结构	21
1.3.1 研究内容	21
1.3.2 本书结构	21
第 2 章 气动噪声的数值模拟方法	23
2.1 引言	23
2.2 声学基础	23
2.2.1 声学概念	23
2.2.2 翼型噪声分类	27
2.3 控制方程	37
2.3.1 质量守恒方程	37
2.3.2 动量守恒方程	38
2.3.3 Lighthill 方程	38
2.3.4 FW-H 方程	39
2.4 湍流模拟方法	41
2.4.1 大涡模拟(LES)	41
2.4.2 URANS 模拟方法	42

2.4.3 分离涡模拟(DES)	47
第3章 典型风力机翼型气动噪声特性研究	49
3.1 引言	49
3.2 数值方法确认	49
3.2.1 算例描述	49
3.2.2 计算方法	50
3.2.3 结果分析	52
3.3 攻角对翼型气动噪声的影响	62
3.3.1 算例描述	62
3.3.2 计算方法	63
3.3.3 结果分析	63
3.4 尾缘厚度对翼型气动噪声的影响	73
3.4.1 算例描述	74
3.4.2 计算方法	74
3.4.3 结果分析	74
3.5 基于涡发生器的翼型降噪研究	85
3.5.1 涡发生器对 DU300 翼型气动噪声的影响	85
3.5.2 涡发生器对 DU400 翼型气动噪声的影响	96
3.6 本章小结	105
第4章 叶片气动噪声特性与降噪研究	107
4.1 引言	107
4.2 不同厚度翼型噪声特性研究	107
4.2.1 DF180 翼型气动噪声特性	108
4.2.2 DF210 翼型气动噪声特性	117
4.2.3 DF250 翼型气动噪声特性	124
4.2.4 DF350 翼型气动噪声特性	130
4.2.5 DF400 翼型气动噪声特性	137
4.3 无涡发生器叶片气动噪声特性	143
4.3.1 算例描述	143
4.3.2 计算方法	143

4.3.3 结果分析	144
4.4 基于涡发生器叶片降噪研究	154
4.4.1 算例描述	154
4.4.2 计算方法	155
4.4.3 结果分析	155
4.5 本章小结	166
第 5 章 结论与展望	169
5.1 结论	169
5.2 展望	171
参考文献	172
附 录	183
致 谢	245

第 1 章 绪 论

1.1 我国风电发展概况

随着环境保护意识和绿色低碳发展理念的深入人心,清洁的可再生能源越来越受到重视。风电作为目前最具大规模开发和技术最成熟的清洁能源,在世界各国得到了大力发展。我国于 2013 年发布了《大气污染防治行动计划》,明确提出要“加快调整能源结构、控制煤炭消费总量、加快清洁能源替代利用、增加清洁能源供应”;2014 年国务院发布了《能源发展战略行动计划(2014—2016)》,再次提出“控制煤炭消费、优化能源结构”,大力发展可再生能源,到 2020 年风电装机达到 2 亿 kW 的目标。这些都体现了风力发电在国家能源结构调整中的重要地位。图 1-1 为 2005—2015 年中国风电累计装机容量与新增装机容量图。根据中国可再生能源学会风能专委会发布的数据显示^[1]:2015 年,中国风电装机量再创新高。新增装机容量 30753MW,同比增长 32.6%;累计装机容量已达 145362MW,同比增长 26.8%。根据全球风能理事会的统计,截止至 2015 年,我国风电累计装机容量和新增装机容量均为世界第一。风电规模的大幅增长既是国家能源结构调整的结果,也是我国风电产业优化升级、不断创新的结果。

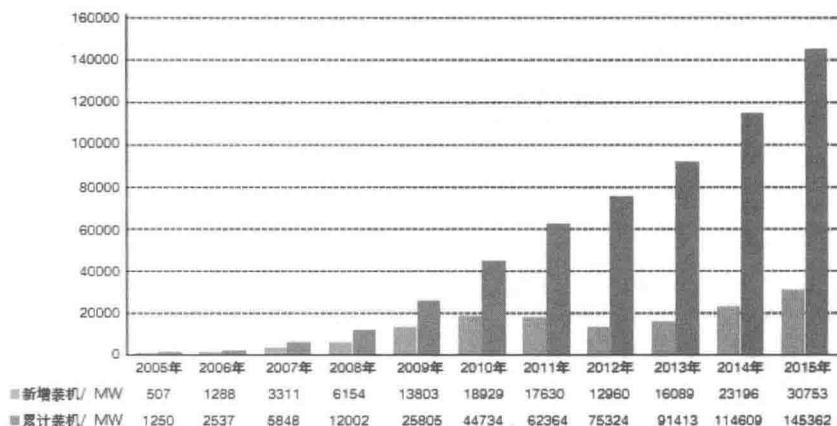


图 1-1 2005—2015 中国风电累计装机容量与新增装机容量^[1]

Fig. 1-1 2005—2015 China's total installed capacity and new installed capacity

图 1-2 为 1991—2015 年中国新增和累计装机的风电平均功率曲线。2015 年,我国新增装机的风电机组平均功率达到 1837kW,与 2014 年的 1768kW 相比,增长 3.9%。图 1-3 为 2015 年中国不同功率风电机组新增装机容量比例图。2015 年,我国新增风电装机中,2MW 风电机组装机市场份额首次超过 1.5MW 机组,占全国新增装机容量的 50%。1.5MW 机组和 2MW 机组仍占市场主导地位,市场份额达到 84%。与 2014 年相比,1.5MW 机组市场份额下降了 12%,而 2MW 机组所占市场份额上升了 9%。2.1MW 至 2.5MW 机组市场份额达到 12%,其中主要是以 2.5MW 为主。2.6MW 至 3MW 机组市场份额达到 2%,其他机组装机占比在 1% 以下。

2015 年,我国累计风电装机中,1.5MW 的风电机组仍占主导地位,占总装机容量的 56%,同比下降约 5%;2MW 的风电机组市场份额上升至 28%,同比上升约 6%。我国目前单机容量最大的是 6MW 机组,除了原有联合动力和明阳风电的产品,金风科技在 2015 年新增吊装一台 6MW 机组。

综上所述,经过十多年的发展,我国风力发电取得了举世瞩目的成就,风电累计装机容量居世界第一,并超过核电成为继火电、水电之后的第三大电力供应源,风电机组的单机最大容量也

发展到了 6MW, 并且大容量机组在新增装机中的比重也越来越重。

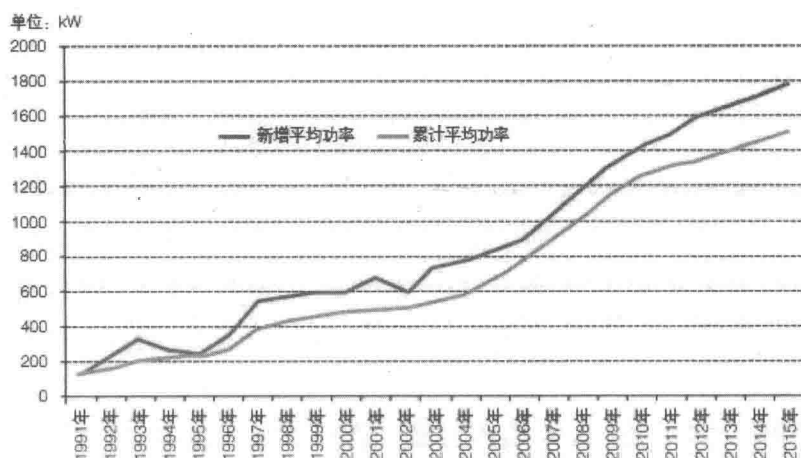


图 1-2 1991—2015 年中国新增和累计装机的风电平均功率^[1]

Fig. 1-2 1991—2015 Wind electricity average power of new installed and total installed in China

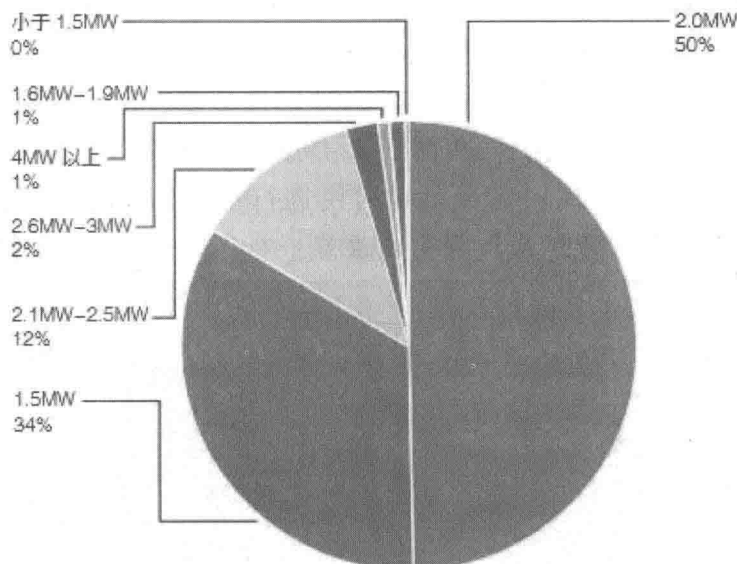


图 1-3 2015 年中国风电机组新增装机容量比例^[1]

Fig. 1-3 2015 Wind generator power ratio of new installed capacity in China

1.2 选题背景及研究现状

1.2.1 选题背景

近年来,随着风力发电机组的大型化与风电场的大规模开发建设,远离居民区的空旷风场越来越稀缺,风电场与居民区的距离变得越来越近,人与噪声的矛盾也越来越显现,风电机组的噪声问题变得较为突出,收到的投诉越来越多,成为关注的热点。

2015年1月16日人民网发表了《华能江苏启东风力发电场噪声扰民》^[2]的报道,根据该报道,华能启东风电场(图1-4)二期工程位于启东市东海镇、寅阳镇东部黄海之滨的垦区,该项目于2010年7月9日开工建设,装机容量94MW,总投资12亿元,是启东市利用风力资源替代煤发电的重要项目。但风场建成之后,当地东海镇兴旺村、兴垦村、吕垦村等5村村民饱受噪声困扰,曾多次向华能启东风力发电有限公司及启东市环保局反映。华能启东风力发电有限公司也曾分两次对相关设备进行了降噪处理,公司针对噪声问题曾分两次共投入1000多万对风力发电机组设备进行降噪处理,同时对受影响村民进行补贴,但噪音扰民问题和居民投诉情况依然未得到明显改善。



图 1-4 华能启东风电场^[2]

Fig. 1-4 Huaneng qidong wind farm

2015年9月,江苏省某电视台报道了该省宿迁市泗洪县龙集镇某风电场噪声扰民问题。该风电场由深圳能源集团开发建设,风电场距居民区仅300米左右。据报道,该风场白天噪声值在50dB以上,晚上噪声值在40dB以上,由于目前国家对风力发电机组噪声还未有明确标准,但依据农村居住环境噪声值国家标准,该噪声值已经超出了国家标准^[3]。

此外,在欧洲、美国等部分地区,风电场也因噪声问题屡遭当地居民投诉。英国Salford大学对该国133个风电场附近居民进行走访调研,通过问卷调查的形式统计了风电场噪声对附近居民生活的影响,调研结果发现,存在噪声扰民的风电场占调查风电场总数的20%。

美国妮娜医生经过5年的调查研究表明^[4],风力发电机组会对附近居民健康产生一定程度的影响,“风电场综合征”会导致一系列健康问题。大量调查结果显示,风力发电机组的噪声会刺激人耳的前庭系统,从而引起耳鸣、眩晕、睡眠障碍、心率过速以及增加心脏病等危险。

针对风电的噪声问题,各国政府或组织机构制定了系列风电噪声相关标准,并根据风电噪声标准来评价风电噪声是否超标。国际电工委员会(International Electro-technical Commission, IEC)针对风电噪声问题,制定了《风力发电机组噪声测量方法》,中国国家标准委员会也于2015年10月再次修订、发布了相关标准《风力发电机组噪声测量方法》,该标准等同采用国际标准IEC 61400-11, ed. 3.0:2012。我国台湾地区于2013年也颁布了相关标准《风力发电机组专属噪音管制标准》,对全频及低频噪声都制定了明确标准,并规定违规风电场将停工半年整顿。国际电气与电子工程协会(IEEE)正在针对风力发电机组气动噪声问题制定相关测量标准。美国威斯康星州(Wisconsin)噪声管理办法规定,风能设备的噪声在居民区不能超过50dB,音调噪声(tonal noise)不能大于45dB,该法规还对音调噪声进行了定义^[5]。此外,一些研究对噪声进行了更严格的限制,例如,其中有一项研究

对人类感知音调噪声影响进行了评估^[6]。

由此可见,风电机组的噪声问题越来越突出,也越来越受到大家重视。因此,控制风力发电机组在运行过程中的噪声问题,是目前风力发电机组设计过程中必须要考虑的一个问题。同时,在国际上,噪声也是风力发电机组设计过程中一个重要的考量指标。能否设计出高效率、低噪声风力发电机组,关系到各国风电机组在国际市场上的竞争力。

1.2.2 叶片气动噪声研究现状

风电机组的噪声源主要包括机械噪声、气动噪声。机械噪声主要是由于机械设备运转时,不同部件之间的摩擦力或非平衡力导致的无规律振动而产生的,可以通过提高机械制造精度、改善润滑、减少摩擦和撞击等方法来降低。而风电机组的气动噪声主要由叶片与塔架的干涉以及流体湍流脉动引起的湍流噪声等,这与流动本身有关。所以气动噪声成为风电机组噪声控制的重要因素。

风力机气动噪声问题是在设计过程中必须要考量的重要指标,这关系到风力机是否能够达到噪声相关标准,也直接影响到风力机组的竞争力,所以风力机气动噪声的预测与降噪非常重要。在早期,风力机气动噪声的预测只能依靠实验测量。Meecham 等人^[7]研究了半隔板多普勒型方向行模型噪声预测方法,并用预测结果与实验值进行了对比。这种简单的噪声预测方法至今在一些工程标准中仍在应用^[8]。1995 年,Voutsinas^[9]将风力机运行过程中的噪声分为两类,一类是低频噪声,另一类是宽带噪声。低频噪声类似于螺旋桨产生的气动噪声,由于风力机前方来流存在湍流以及叶片与塔架之间的相互作用,风轮在旋转过程中周期扫过塔架,以及叶片表面气动载荷的周期变化,使流场中存在周期出现了特性的谐波噪声。研究表明,如果能准确预测流场中的压力脉动,那么声压脉动便可以准确预测。因此,低

频噪声预测问题的关键是叶片表面脉动压力的准确预估。宽带噪声主要由翼型自噪声及湍流来流与叶片相互作用产生噪声。叶片的自噪声只是叶片表面流动而引起的噪声类型,自噪声的噪声源主要包括:层流边界层尾缘脱落涡噪声、湍流边界层尾缘噪声、分离流噪声、钝尾缘噪声、叶尖涡噪声等。

风力机叶片叶尖涡噪声主要由于叶片叶尖涡引起,叶尖噪声强度与叶尖涡强度、叶尖部位的几何形状等因素密切相关。

近年来,人们针对尾缘噪声进行了大量反复的研究工作。1999年,Bart A Singer^[10]等人利用CFD对NACA翼型进行了数值模拟,研究了翼型尾缘噪声。结果表明,翼型尾缘边界层与翼型尾缘相互作用会引起尾缘脱落涡,而这就是产生尾缘气动噪声的主要原因。大量研究表明,尾缘噪声是风力机来气动噪声的主要来源之一。因此,尾缘噪声问题在理论原理、数值计算模型以及实验验证等方面受到了广泛的关注。

对尾缘噪声最早的实验研究起始于1973年,由UAR实验室和Sikorsky飞机公司^[11]最先开始,他们在多攻角、雷诺数在 $8 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^6$ 的工况下对NACA0012和0018进行了风洞声学实验,通过麦克风设备来收集尾缘噪声数据。研究表明,针对同一攻角,在较低雷诺数条件下,尾缘噪声数据可以被检测到;在较高雷诺数的条件下则很难被检测到,当雷诺数达到最高时,翼型的尾缘噪声就几乎不能够分辨出来。

Brooks^[12-13]等人在NASA兰利研究中心利用QFF(Quiet Flow Facility)声学设备对NACA0012翼型进行了实验研究。他们在翼型表面安装了一系列压力传感器来监测翼型表面的压力波动,并且通过改变尾缘厚度的方法分析尾缘噪声与尾缘厚度的相关性。他们还利用COP方法比较全面的对翼型自噪声进行了实验研究,他们通过改变翼型的攻角、弦长、来流速度以及叶尖条件着重研究了尾缘噪声的变化规律。

随着风力机气动噪声研究的深入,风力机气动噪声的预测得到了快速发展,目前主要有两种噪声预测方法:一种是基于经验

模型的预测方法(BPM);另一种是基于计算气动声学与计算流体力学方法(FW-H/CFD)。第一种方法计算速度快,但计算精度较差,目前多用于工程应用。第二种方法计算精度相对高,但计算量大,目前还只能应用于基础研究。

BPM 研究现状:

Brooks 等人^[14]以 NACA0012 翼型为研究对象,在大量实验及理论分析基础上,提出了一种气动噪声半经验预测方法,并将该方法命名为 BPM 模型。其利用该方法计算得到结果与 Voutsinas^[9]的实验结果进行对比,发现计算结果与实验结果吻合较好,从而 BPM 模型被广泛应用于风力机叶片气动噪声预测。该方法将叶片与流体相互作用的三维无黏流动简化为叶片展向有限个数二维翼型进行计算,即单独计算叶片展向每个截面位置处二维翼型的气动噪声,最后将每部分翼型得到的噪声按一定方法叠加到一起得到叶片的总噪声。

从 BPM 模型建立至今,大量学者采用该方法对风力机叶片气动噪声进行了计算,其中包括:Voutsinas^[9],1995;Fuglsang 和 Madsen^[15],1996;Moriarty 和 Migliore^[16],2003;Leloudas^[17]等,2007;Herr^[18-20]。从计算结果来看,BPM 预测结果与实验结果^[9]吻合良好。另外,该模型还能较好预测翼型自噪声^[8]。

大量研究表明,大部分情况下,基于 BPM 模型的计算均能较好预测翼型及风力机叶片气动噪声。但在某些特殊情况下,该方法不能得到良好结果。Moriarty 等^[16]利用该方法对 NACA0012 及 S822 翼型气动噪声进行计算,并与风洞结果进行对比,发现对于 NACA0012 翼型,当雷诺数较低时,计算值与实验值吻合较好,而对于 S822 翼型,此时预测结果与实验结果相差较大。分析原因可能是半经验模型中的大量数据均是基于 NACA0012 得到的,所以对于 S822 翼型在某些工况下效果较差一些。Fuglsang 等^[15]认为 BPM 模型只针对 NACA0012 气动噪声计算精度高。Lowson^[21-23]为使 BPM 模型更加具有通用性,其在对 Brooks 等人的实验数据深入分析的基础上,将模型进行简化,减少了人为