

考虑温度变化影响的风机叶片噪声数值预测研究

吴志 杨海波 苏小东 王万健 王振龙

北方民族大学 土木工程学院，宁夏银川，750030；

摘要：受大气环境影响，不同温度情形下传播介质的黏性会发生显著变化，进而引起声场的特征变化。本文主要研究温度变化时风机叶片噪声的传播规律，重点考察半空间内风机叶片的声传播特性。受温度影响，传播介质的传播速度数值预测研究表明，自由空间内点源噪声引起的散射效应会对声场分布规律造成一定的影响，散射效应带来的影响随波数增大会逐渐放大，选择 NACA0012 和 NACA0018 翼型两个模型进行对比分析。半空间内由叶片表面和空间边界引起的散射则会完全改变声场分布，不同结构引起的散射效应差异显著，同时不同温度环境引起的声衰减带来的影响也不可忽视。本文所开展的预测研究能够为风机叶片降噪研究提供数据参考，且有助于风机选型。

关键词：风机叶片；温度；散射效应；地面边界；数值预测

DOI：10.69979/3029-2727.25.07.031

引言

风能，作为重要的自然能源之一，往往具有巨大的优势。对于风能优势储备巨大的我国西北区域，能够较好的利用风能不仅兼具节约能源和降低碳排放优点，因此在近十年来得到广泛的应用。然而，风力资源较好的应用受限因素很多，其中典型的问题就涉及风机叶片运行过程中产生的低频噪声及风机叶片的选型。因此，风机低频噪声对人体健康带来的影响近年来也得到一致的关注。同时，西北地区四季气候变化较大，由温度变化产生的影响也进一步造成风机叶片噪声声场物理特征的改变，这也是亟需关注的问题。

考虑到上述问题，本文结合二维 NACA0012 和 NACA0018 叶片模型，基于风机塔架高度与叶片尺寸比值为 3~4 的物理事实，在半空间内开展两种风机型号受温

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \nabla^2 g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau)$$
$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \right|_{S+S_h} = 0$$

其中， c_0 表示声传播速度， $g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$ 为半空间内结构边界和物理边界影响下的声波信号传播解， S 和 S_h 分别表示结构边界和半空间边界， δ 表示狄拉克广义函数， \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 分别表示监测器和声源点位置， t

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \nabla^2 g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau)$$
$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \right|_{S_b} = 0$$

度影响的噪声传播数值预测研究。首先，给出了半空间噪声传播的预测模型和计算方法；其次，在常温环境下开展二维 NACA0012 和 NACA0018 翼型的远场声波预测研究，并进行对比分析；接下来，重点研究温度变化带来的影响，考虑季节交替影响下三种不同环境温度工况下两种叶片型号的声传播规律；最后，给出了全文结论。

1 模型方程

在半空间物理模型中，声传播往往受到结构边界和空间边界的影响，因此点源发出的声波并不是直接到达远场监测点，有一部分声波往往会传播到达结构边界和空间边界发生折射、衍射等物理现象，然后继续向远场传播。当所考虑的是固定位置的单位点源时，声波传播遵循的物理方程为

(1)

和 τ 分别表示声波信号接收时刻和发出时刻。

在半空间内，当不包含结构边界时，此时声传播解满足的方程为

(2)

其中, $g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$ 表示半空间内不包含结构的声传播解。结合方程(1)和(2), 可以直接获得由 $g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$ 表示的半空间内声传播散射解

$$g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) = g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S+S_b} \left[g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{z}, t') \frac{\partial g_b(\mathbf{z}, t'; \mathbf{y}, \tau)}{\partial \mathbf{n}} - g_b(\mathbf{z}, t'; \mathbf{y}, \tau) \frac{\partial g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{z}, t')}{\partial \mathbf{n}} \right] ds dt' \quad (3)$$

本文开展的研究工作重点是考虑声场在不同频率下的变化特征, 在频域空间内研究噪声的传播, 对方程(3)两侧进行 FFT 变换, 可得如下频域积分表达式

$$G_s(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) = G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) + \int_{S+S_b} \left[G_{bs}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) \frac{\partial G_b(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} - G_b(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial G_s(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} \right] dS_y \quad (4)$$

其中, $G_s(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ 为 $g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$ 的频域形式, 表示频域空间内包含结构边界的点源传播解; $G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ 为 $g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$ 的频域形式, 存在解析解表达式, 表示频域空间内不包含结构边界的点源声传播解, $\omega = 2\pi f$ 表示角频率, f 代表频率。以本文研究的二维问题为例, $G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ 对应的解析解形式为

$$G_b(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) = \frac{j}{4} [H_0^{(1)}(k|\mathbf{x}-\mathbf{y}|) + H_0^{(1)}(k|\mathbf{x}-\mathbf{y}'|)] \quad (5)$$

此处, \mathbf{y}' 表示 \mathbf{y} 关于半空间边界 S_b 的镜像对称点, $H_0^{(1)}$ 表示第一类零阶函数, k 表示波数, 且满足 $k = \frac{2\pi f}{c_0}$ 。

本文数值预测研究结合自编程序语言进行, 重点研

究工作结合方程(4)和(5)进行, 图 1 给出了 NACA012 和 NACA0018 翼型的拓扑形状边界, 主要研究步骤如下:

- (1) 将翼型表面离散为多个网格单元;
- (2) 结合方程(4)计算结构边界和空间边界上的散射声源信息, 离散方程如下

$$G_s(\mathbf{x}, \mathbf{y}_p, \omega) = G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}_p, \omega) + \sum_{i=1}^m \int_{\{S+S_b\}_i} \left[G_{bs}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) \frac{\partial G_b(\mathbf{z}, \mathbf{y}_p, \omega)}{\partial \mathbf{n}} - G_b(\mathbf{z}, \mathbf{y}_p, \omega) \frac{\partial G_s(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} \right] dS_y$$

m 表示结构边界上离散的边界单元数目。

(3) 计算远场监测点 \mathbf{x} 的噪声信号。

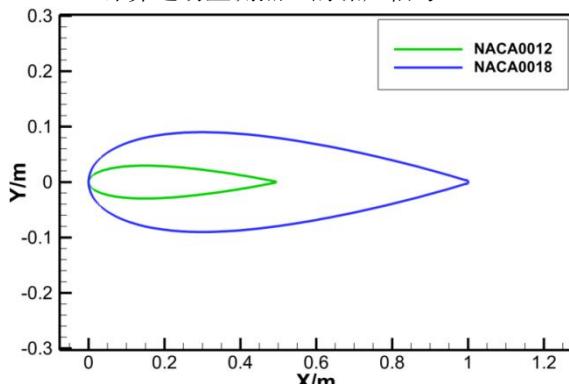


图 1 二维平面内翼型拓扑形状

2 数值预测研究

2.1 常温状态下的远场噪声分布

首先考察常温状态下半空间内的噪声分布, 选取两种弦长不同的翼型开展研究工作, NACA0012 翼型和 NACA0018 翼型, 两种翼型对应的弦长分别为 C12=0.5m、C18=1.0m。所有结构边界和地面边界均选取为刚性边界, 翼型前缘位于二维 x-y 平面内的原点位置, 地面边界放置在翼型前缘下方垂直高度为 4 倍 NACA0012 翼型弦长的位置, 单位点源布置在翼型斜上方 (C, 0.2C) 坐标点处。以翼型前缘为圆心, 在远场半径 R=50C18 的圆周上均匀布置 120 个监测点。

图 2 显示了不同波数下 NACA0012 翼型和 NACA0018 翼型的远场噪声比较图示。如图所示, 半空间声场中的

两种翼型的噪声分布总体上差异较大, $k=10$ 的低波数情形下的 NACA0012 翼型噪声稍大于 NACA0018 翼型, 且 NACA0018 翼型的声场分布更均匀; 在 $k=50$ 的高波数情形下, NACA0018 翼型噪声显著大于 NACA0012 翼型, 且均在 120 度方向出现最大声压幅值。高波数下两种翼型声场出现上述差异的原因在于, NACA0018 翼型的拓扑形状及表面边界远大于 NACA0012 翼型, 由此产生的边界散射效应也会更强, 在辐射噪声不变的情形下, 散射效应强将直接导致较大的散射噪声, 所以出现了 NACA0018 翼型远场总声压幅值较大的物理现象。

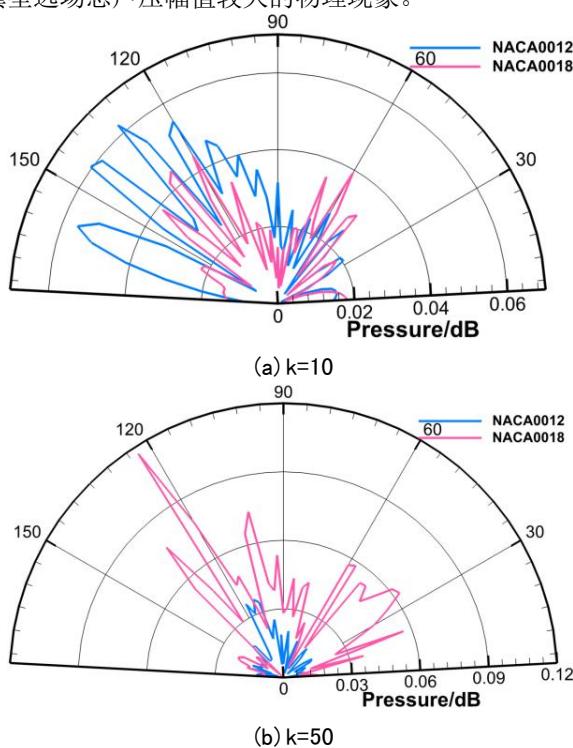


图 2 二维半空间内翼型远场声压指向性分布

2.2 极端天气情形下的远场噪声分布

基于常温状态下的两种翼型声场特征的研究, 继续开展极端天气情形下两种翼型的远场噪声分布研究。为与常温状态下声场进行比较, 此处选定两种极端天气情形, 见表 1 所示。由表 1 可知, 随着温度升高, 空气密度不断减小, 声传播速度显著增大, 下面重点考虑三种温度工况下声压在传播过程中的变化规律。

表 2 不同工况的空气物理参数

工况	温度 T(°C)	密度 ρ (kg/m³)	声传播速度 c₀(m/s)
1	-20	1.395	318.7
2	10	1.247	340.2
3	40	1.128	354.4

假设观察点位于上半圆周 30 度方向的直线上, 图 3

显示了不同波数下 NACA0012 翼型的声压随距离变化的曲线。由图可知, 不同温度工况下相同传播距离的声压幅值差异显著, 低波数情形下, 相同传播距离处工况 3 的声压幅值最大, 且声压幅值随着温度升高呈现逐渐增大的趋势, 这是因为相同传播距离处, 工况 3 对应的传播速度最高为 354.4m/s, 因此传播到达相同传播距离的时间较少, 声能量衰减较少, 因此声压幅值最大。然而, 在高波数情形下并不呈现这样的变化趋势, 在 $k=50$ 情形下, 相同传播距离处工况 3 的声压幅值最小, 工况 1 在传播距离大于 100m 后, 声压幅值最大。

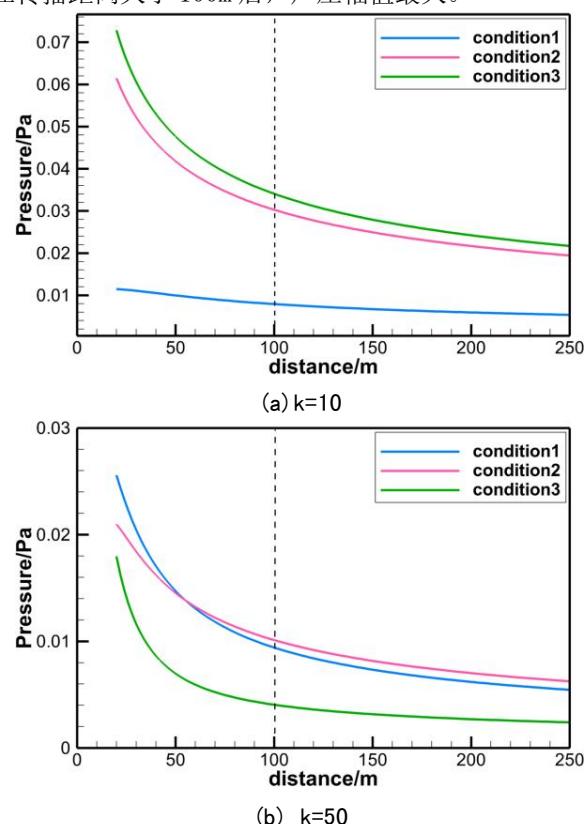


图 3 三种工况下 NACA0012 翼型沿 30 度方向声压随距离的变化曲线

将观察点放置在与图 3 相同的位置, 图 4 给出了不同波数下 NACA0018 翼型的声压随距离的变化曲线。区别于 NACA0012 翼型, 在相同传播距离处, 低波数下 NACA0018 翼型的远场噪声并不会随着温度的升高呈现逐渐增大的趋势, 而是呈现相反的变化趋势, 工况 3 对应的声压幅值最小, 工况 1 对应的声压幅值最大。在高波数情形下, 当传播距离超过 50m 后, 工况 2 对应的声压幅值最大, 工况 3 对应的声压幅值最小, 这与 NACA0012 在高波数下的变化规律一致。低波数下变化趋势相反的原因可能在于 NACA0018 和 NACA0012 翼型的表面结构

不同，在低波数下，不同结构尺寸的翼型可能诱发的散射噪声会更大，同时温度变化又会引起声能量的耗散和衰减，因而导致了图 4 所示的变化趋势。也是因为 NACA0018 翼型的结构尺寸更大，散射效应更强，将图 3 和图 4 比较会发现，不同波数下，NACA0018 翼型在相同传播距离处的声压幅值会更大。

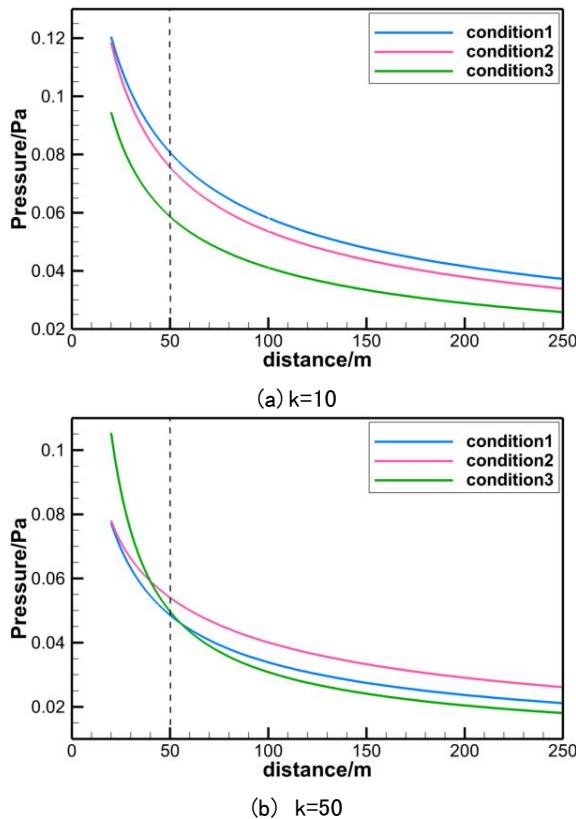


图 4 三种工况下 NACA0012 翼型沿 30 度方向声压随距离的变化曲线

3 结论

本文重点考察了不同温度环境下传播介质的属性对声场的影响，对比分析了 NACA0012 和 NACA0018 翼型的声场特征分布，主要得到如下结论：

(1) 常温状态下 NACA0012 翼型和 NACA0018 翼型的声压指向性差异较大，在低波数情形下两种翼型的远

场噪声相差不多，然而高波数情形下 NACA0018 翼型噪声显著大于 NACA0012 翼型噪声，说明不同结构的拓扑形状引起的散射效应不同，从而影响远场总噪声。

(2) 考虑不同温度传播介质带来的影响，数值结果显示 NACA0012 翼型在低波数情形下相同传播距离处的声压幅值随温度升高会逐渐增大，NACA0018 翼型则恰恰相反，然而高波数情形下两种翼型在三种温度工况环境下声传播则显现出相似的变化规律，说明在低波数下不同结构尺寸的翼型可能诱发的散射噪声会更大，同时温度变化又会引起声能量的耗散和衰减，这两种因素同时会影响声场的特征分布；而在高波数情形下，温度变化对声场的影响更大。

参考文献

- [1] 杨康健. 基于声学反馈的风机降噪实验研究 [J]. 山东电力高等专科学院学报, 2025, 28(1): 54–56.
- [2] 娄砚钧. 海上风机水下噪声数值模拟 [J]. 大连理工大学学报, 2024, 64(3):
- [3] 韩非非. 多翼离心风机气动噪声数值预测 [J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2024, 42(2): 34–37.
- [4] 林康, 沈承, 王斌等. 某离心风机气动噪声计算与控制研究 [J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 24–31.
- [5] 刘宇新, 潘航平, 姜婷婷. 风机降噪控制策略研究 [J]. 水力发电, 2023, 08: 108–113.
- [6] 徐以强, 风电场噪声问题研究 [J]. 上海节能, 2022, 02: 204–209.

作者简介：吴志，出生年月：2000 年 12 月 27 日，性别：男，民族：汉族，工作单位：北方民族大学，省市：宁夏银川（750030），籍贯：贵州

本项目由北方民族大学国家级大学生创新创业训练计划项目“考虑介质粘性的风力机噪声传输及降噪研究”（编号：202411407028）资助完成。