

# 风机叶片点源散射辐射噪声数值预测研究

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:** 本文主要研究带地面边界影响下的风机叶片点源噪声的传播规律, 重点考察自由空间和半空间内风机叶片引起的点源噪声散射效应。考虑到叶片尺寸大于声波波长, 远场检测器接收到的声波信号包含辐射噪声和散射噪声两部分。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, 半空间内由叶片表面和空间边界引起的散射效应则会完全改变声场分布。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; 散射效应; 地面边界; 数值预测

**DOI:** 10.69979/3041-0673.25.08.019

## 引言

随着节能减排和低碳行动的大力倡导下, 绿色发展理念已经渗透到国民经济和人居生活的长期发展规划中。风力发电作为绿色清洁能源之一, 为城市发展提供了极大的便利。合适的风机叶片型号有助于改善风机远场传播的低频噪声信号, 从而改善人居环境。

本文结合二维 NACA0012 叶片模型, 在自由空间和半空间内分布开展点源噪声影响下风机叶片的远远噪声数值预测研究。第一步介绍了噪声预测对应的模型方

程和预测方法; 第二步在自由空间内开展了点源噪声引起的叶片散射噪声数值医学研究; 第三步开展了带地面边界影响的半空间内叶片噪声远场数值预测; 最后, 给出了自由空间和半空间内噪声分布的比较分析, 并进一步总结了点源噪声影响下翼型散射噪声的声场分布特征, 并对实际工况环境下开展降噪和选型提出了合理化建议。

## 1 模型方程

已知线性声波在自由空间内传播时遵循的方程为

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g_0(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \nabla^2 g_0(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau) \quad (1)$$

其中  $c_0$  表示线性声波在介质中的传播速度, 常温 15°C 状态下  $c_0 = 340 \text{ m/s}$ ,  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$  分别表示监测点和声源点的空间位置,  $g_0(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$  表示  $\tau$  时刻位于  $\mathbf{y}$  的点源发出的声波在  $t$  时刻传播到达监测点  $\mathbf{x}$  的声波信号强度,  $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{y})$  和  $\delta(t - \tau)$  表示 Delta 函数。

不同于自由空间内点源的声传播, 当物理空间内包含边界时, 点源发出的声波在到达物理边界时会发生散射并进行二次传播到达远场监测点。对应于包含结构的自由空间, 声波传播的物理方程可表达为

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \nabla^2 g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) &= \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau) \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \Big|_S &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$  为自由空间内结构影响下的声波信号传播解,  $S$  为结构表面。在半空间内, 往往包含地面边界的影响, 此时声传播解满足的方程为

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \nabla^2 g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) &= \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau) \\ \left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \right|_{S_b} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

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,  $S_b$  表示地面边界。参照方程 (1) 和 (2) 当半空间内包含结构时, 声波传播解满足的方程可以表达为

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) - \nabla^2 g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) &= \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau) \\ \left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \right|_{S+S_b} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau)$  表示半空间内不包含结构的声传播解。

下面重点研究如何获得自由空间和半空间内包含结构的声传播解, 首先结合方程 (1) 和方程 (2), 利用积分法可得如下表达式

$$\begin{aligned} g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) &= g_0(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \\ &- \int_{-\infty}^{\infty} \int_S \left[ g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{z}, t') \frac{\partial g_0(\mathbf{z}, t'; \mathbf{y}, \tau)}{\partial \mathbf{n}} - g_0(\mathbf{z}, t'; \mathbf{y}, \tau) \frac{\partial g_s(\mathbf{x}, t; \mathbf{z}, t')}{\partial \mathbf{n}} \right] ds d\tau \end{aligned} \quad (5)$$

仿照上述做法, 结合方程 (3) 和方程 (4) 可得

$$\begin{aligned} g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) &= g_b(\mathbf{x}, t; \mathbf{y}, \tau) \\ &- \int_{-\infty}^{\infty} \int_S \left[ g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{z}, t') \frac{\partial g_b(\mathbf{z}, t'; \mathbf{y}, \tau)}{\partial \mathbf{n}} - g_b(\mathbf{z}, t'; \mathbf{y}, \tau) \frac{\partial g_{bs}(\mathbf{x}, t; \mathbf{z}, t')}{\partial \mathbf{n}} \right] ds d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

为研究频域空间内的声传播, 对方程 (5) - (6) 两端实施 FFT 变换, 分别得到频域空间内自由空间和半空间内包含结构边界的声传播解

$$\begin{aligned} G_s(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) &= G_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \\ &+ \int_S \left[ G_s(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) \frac{\partial G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} - G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial G_s(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} \right] ds_y \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} G_{bs}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) &= G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \\ &+ \int_{S+S_b} \left[ G_{bs}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) \frac{\partial G_b(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} - G_b(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial G_{bs}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)}{\partial \mathbf{n}} \right] ds_y \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)$  和  $G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$  分别表示频域形式的自由空间格林函数和半空间格林函数, 其它以此类推。自由空间和半空间内无物理边界时,  $G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)$  和  $G_b(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$  存在解析形式。以本文研究的二维问题为例, 对应的解析解可表达为

$$\begin{aligned} G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) &= \frac{j}{4} H_0^{(1)}(k |\mathbf{x} - \mathbf{y}|) \\ G_b(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) &= \frac{j}{4} [H_0^{(1)}(k |\mathbf{x} - \mathbf{y}|) + H_0^{(1)}(k |\mathbf{x} - \mathbf{y}'|)] \end{aligned}$$

此处,  $\mathbf{y}'$  表示  $\mathbf{y}$  关于半空间边界  $S_b$  的镜像对称点。

数值预测研究结合 Fortran 语言编写程序, 结合方程 (7) - (8) 开展研究工作。对于本文所选择的 NACA

0012 模型, 在已知点源的情形下, 主要涉及如下步骤:

- (1) 将翼型表面按拓扑结构划分为多个网格单元;
- (2) 计算叶片表面每个网格单元对应的散射声源;
- (3) 计算远场任意监测点的声压。

二维空间内 NACA0012 翼型的结构如图 1 所示, 其前缘位于 (0, 0) 尾缘位于 (0.495m, 0)。翼型弦长为  $C=0.495\text{m}$ , 其表面为刚性边界, 将其按拓扑结构划分为 36 个网格单元。

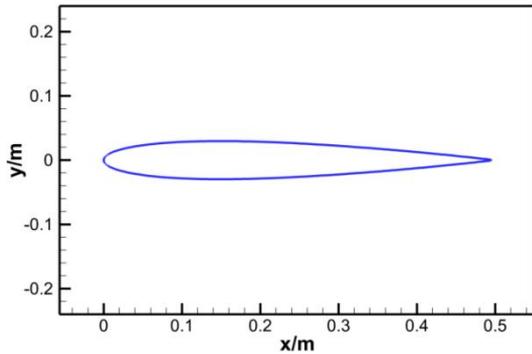


图 1 二维 NACA0012 翼型空间分布

## 2 数值预测研究

### 2.1 自由空间内 NACA0012 模型诱发的噪声

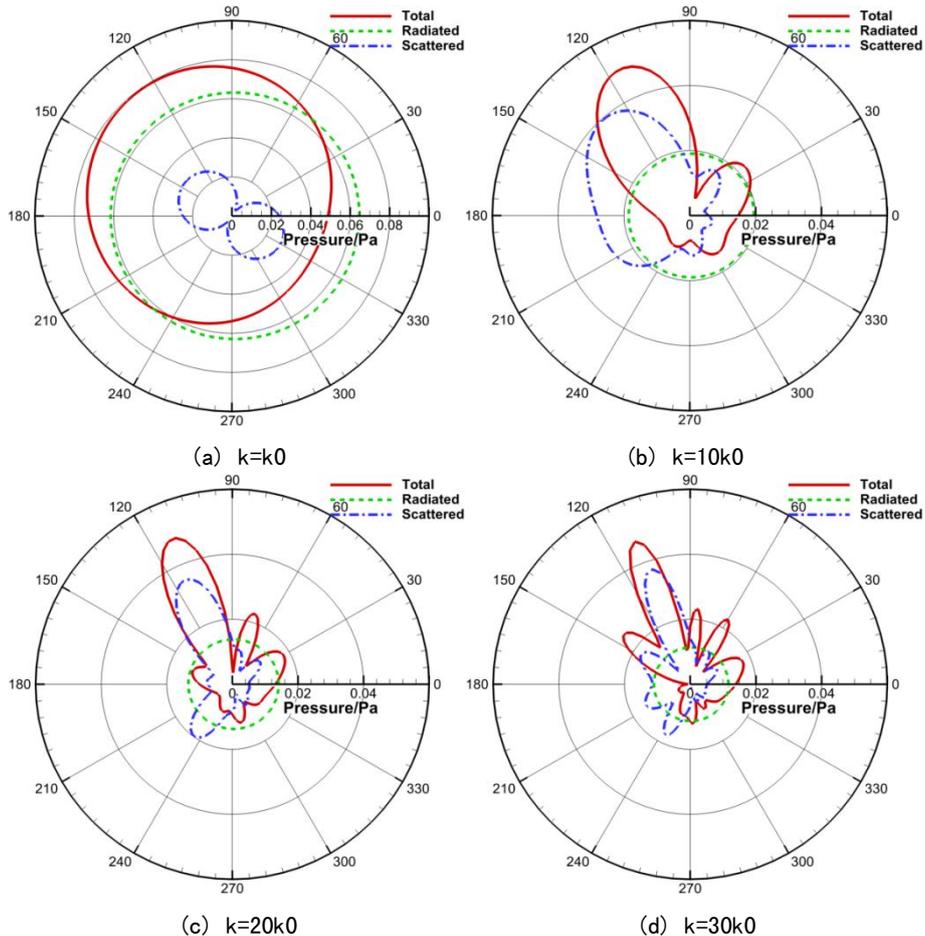


图 2 自由空间内不同波数情形下 NACA0012 翼型远场声压分布

首先考察自由空间内点源情形下 NACA0012 模型诱发的辐射散射噪声, 单位点声源位于 (0.5m, 0.04m), 在半径  $R=10\text{m}$  的圆周上均匀布置 120 个监测器, 图 2 显示了不同波数情形下远场监测点接收到的声学信号分布。其中,  $k_0=1$  表示单位波数。其中, Total 代表自由空间的总声压, Radiated 和 Scattered 分别代表辐射声和散射声。由图 2(a) 可知, 在低波数情形下, 辐射噪声占优, 散射噪声明显小于辐射噪声, 且声学信号的幅值沿各个传播方向的大小基本一致。图 2(b)-(d) 显示, 在中、高波数下, 散射噪声信号带来的影响显著大于辐射噪声信号带来的影响, 且随着波数的增大, 散射效应越来越显著。同时, 各个传播方向的声学信号幅值差异显著, 位于  $90^\circ \sim 150^\circ$  之间的监测器接收到的声学信号明显大于其它方向监测器的声学信号, 总声压指向性分布也由低波数的光滑圆周状分布逐渐过渡为多花瓣状, 且花瓣数目随波数逐渐增多。上述数值结果说明翼型表面带来的散射效应在全波数下完全改变了声场的空间分布, 高波数下的声场特征分布主要由散射噪声信号决定, 因此不能忽略。

## 2.2 半空间内 NACA0012 模型诱发的噪声

实际工程问题中的风力机叶片由塔架支撑，然而塔架与地面的距离往往是3~4倍的风机叶片弦长，因此噪声信号在传播过程中会受地面的影响，从而引发散射噪声信号，这部分噪声信号由会造成总声压的空间分布，因此不容忽视。如图1所示，在叶片前缘下方4倍弦长处布置半空间边界，从而考察半空间内叶片引起的声散射影响。由3.1可知，在包含NACA0012翼型的自由空间内，远场监测器接收到的声学信号由辐射噪声和散射噪声两部分，在包含半空间边界的物理问题中远场噪声信号主要构成包含如下几个方面：

- (1) 辐射噪声： $y \rightarrow x$ ,
- (2) 翼型表面散射噪声： $y \rightarrow S \rightarrow x$
- (3) 地面边界散射噪声： $y \rightarrow S_b \rightarrow x$

本节中物理参数选择与3.1节相同，在上半空间半径为 $R=10m$ 的半圆周( $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间)均匀布置60个

监测器，图3显示了半空间内NACA0012翼型诱发的远场噪声分布。其中，Total代表半空间的总声压，Radiated和Scattered分别代表辐射声和散射声。由图3(a)可知，即使在低波数情形下，翼面散射噪声的影响与辐射噪声相当，且对远场噪声分布产生了一定程度的影响，在 $k=10k_0$ 情形下，已经呈现出完全由散射噪声决定声场分布的物理特征，图3(c)-(d)显示的高波数声场尤其如此。随着频率和波数的不断增大，整体声压幅值不断减小，波瓣数目逐渐增多，这一点与自由空间内声场特征分布相似。不同之处在于，半空间声场在高波数情形下声场特征分布基本上由散射噪声决定，且高波数下的花瓣数目急剧增加。在波数 $k=10k_0$ ，声压的远场分布呈现 $130^\circ \sim 160^\circ$ 之间幅值最大；在波数 $k=20k_0$ 、 $30k_0$ ，声压的远场分布则呈现 $110^\circ \sim 120^\circ$ 之间幅值最大。由此可见，无论是自由空间还是半空间问题，在相同声源信号的前提下，高波数下的最大声压分布方向是基本一致的。

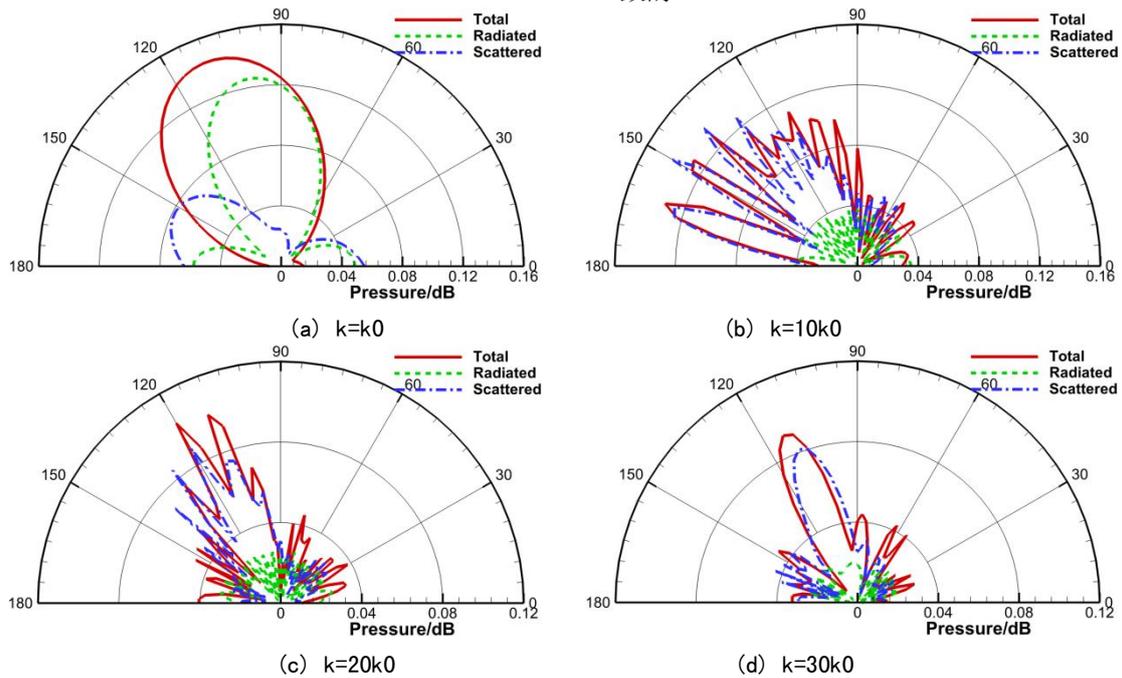


图3 半空间内不同波数情形下NACA0012翼型远场声压分布

## 3 结论

本文重点开展了带地面边界影响下的风机叶片点源噪声的声场物理特征分布研究，对比分析了自由空间内的点源声场分布。基于详尽的数值预测研究，得到下述结论：

(1) 自由空间内的声场分布在低波数情形下主要是辐射噪声决定，随着波数的增大，散射噪声逐渐对声

场分布产生影响，由中波数情形下的改变声场结构到高波数情形下基本决定声场特征的趋势发展，说明翼型表面引起的散射效应不容忽视。同时，在中、高波数情形下，受散射效应的影响，远场噪声由低波数的光滑圆周状分布逐渐过渡为多花瓣状，且花瓣数目随波数逐渐增多，说明多个监测器均能接收到强声压信号。

(2) 不同于自由空间声场分布，在给定相同物理参数的半空间内部，声场分布在低波数情形下就受到散

射效应的显著影响,随着波数增大,声场表现出与自由空间声场分布相似的特征,远场声压整体幅值不断减小,波瓣数目逐渐增多。然而不同之处在于,中波数情形下半空间声场的散射效应即呈现出决定总声压分布特征的趋势,高波数情形下最大声压幅值出现在位于 $110^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间的监测器。同时,相同波数下,半空间声场的噪声幅值显著大于自由空间的声场幅值。总体上半空间声场的散射效应更强,这与半空间地面有直接联系。

致谢

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。

### 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

东电力高等专科学校学报,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:姓名: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。