

基于 Matlab GUI 的风电场噪声预测软件开发

施 祥^{1a}, 李争光^{1b}, 方 琳²

(1. 浙江科技学院 a. 信息与工程学院; b. 土木与建筑工程学院, 杭州 310023;
2. 浙江大学 环境与资源学院, 杭州 310058)

摘 要: 为了准确预测风力发电中风电机组产生的噪声污染范围及程度,设计了一款风电场噪声预测软件。软件基于风电机组噪声预测的数学模型,采用 Matlab 语言编写,开发了相应的图形用户界面(GUI)。该软件能结合不同地面类型(山地、草地、平地),实现风电场周边环境的等声级线图绘制和敏感点噪声计算。

关键词: 风电场; 噪声预测; Matlab GUI

中图分类号: TP311.52; TB529

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)06-0427-06

Prediction software development for wind farm noise based on Matlab GUI

SHI Xiang^{1a}, LI Zhengguang^{1b}, FANG Lin²

(1a. School of Information and Electronic Engineering; 1b. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. College of Environment and Resources Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Prediction software for wind farm noise was developed to predict the noise pollution level and range from the wind farm when wind turbines convert wind energy into electricity. The software was based on mathematical model of wind turbine noise prediction using Matlab language, and the graphical user interface (GUI) was also developed. This software can realize wind farm acoustic contour drawing in the field of different ground types (mountain land, grassland, flatland). Also, it can realize noise prediction of sensitive points.

Keywords: wind farm; noise prediction; Matlab GUI

风能作为一种重要的清洁能源,近年来被当作补充能源广泛应用。风电机组作为风力发电的重要设备,在把风能转换为电能的同时,也产生了令人烦恼的噪声污染问题。由风电机组叶片旋转产生的空气动力性噪声是风电机组最主要的噪声来源。该部分噪声属于宽频噪声,低频成分较为显著,与高频声相

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 浙江省教育厅科研计划项目(Y201120159);浙江省省级重点实验室项目(2016REWB03)

作者简介: 施 祥(1973—),男,浙江省杭州人,讲师,硕士,主要从事声学与电子技术研究。

比,经过相同的传播距离后空气吸收衰减较小,因此,距风电场较远处的居民仍可能受其影响^[1-2]。当前,风电场的风电机组噪声问题已成为风电场选址的一个重要考虑因素^[3]。

要实现对风电场风电机组噪声的预测,不仅需要科学的噪声传播数学模型,也需要采用合适的计算机语言进行编程计算。在 PC 机上实现风电场噪声模拟计算的编程语言有很多种,国内外同类预测软件一般采用 VB、C++ 等平台语言开发,开发周期较长。Matlab 是一种用于科学与统计计算的专业工具语言,科学计算更加简便快捷,只要少量语句就能实现指数、积分等运算,而且有专门的图形处理函数^[4]。因此,本研究基于风电场噪声预测的数学模型,采用 Matlab 语言编写风电场的声环境模拟计算程序,并利用 Matlab 的 GUIDE 交互界面开发工具,设计了风电场声场模拟的图形用户界面(graphical user interface,GUI)。

1 风电场噪声预测的数学模型

20 世纪 80 年代,后缘钝形的双叶片风电机组噪声预测模型由美国国家航空航天局^[5-6](National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出,得到较广泛的认可。随着风电技术的发展和进步,当前主流风电机组都是后缘为尖形的三叶片结构。因此,该模型已不能准确预测风电机组噪声。针对当前的风电机组,已有国内学者在该模型上进行了修正^[7-8]。

1.1 风电机组的噪声预测模型

风电机组的宽频噪声预测模型如图 1 所示。风电机组位于 z 立面;声场中任意点 P 设为噪声传播预测点;风电机组叶轮中心点坐标 (x_i, y_i, z_i) ;预测点 P 坐标 (x, y, z) ;风电机组轮毂高度 h, m ;风轮半径 R, m ;风轮中心点到预测点的距离是 r_0, m ;风轮中心和预测点连线与风轮转动平面间的夹角 φ, rad 。

根据理论和实测分析,当前风电机组的宽频噪声主要由吸入湍流噪声和湍流边界层流动噪声两部分组成^[7]。吸入湍流噪声是指空气流动的随机振动引起的风电机组叶片表面噪声,湍流边界层流动噪声是指叶片后缘与湍流边界层相互作用产生的噪声。2 种噪声的计算公式如下:

$$L_{p1,1/3}(f) = 10\lg[B\sin^2\varphi\sigma^2 C_{0.7} R\sigma^2 U_{0.7}^4 / (r_0^2 c_0^2)] + K_a(f), \quad (1)$$

$$f_{\text{peak}} = SU_{0.7} / (h - 0.7R)。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $L_{p1,1/3}$ 为吸入湍流噪声 1/3 倍频程频带声压级, dB; B 为风电机的叶片数量; $C_{0.7}$ 为位于 0.7 倍风轮半径的叶片弦长, m; σ^2 为平均紊流强度; $U_{0.7}$ 为位于 0.7 倍风轮半径的自由层速率, m/s; ρ, c_0 分别为空气密度、声速; f_{peak} 为风电机组的特征频率,当 $f = f_{\text{peak}}$ 时, $K_a(f)$ 达到最大值; S 为斯特劳哈尔数,取值 16.6; $K_a(f)$ 为与频率相关的修正因子,该因子通过实际测量得到,如图 2 所示。

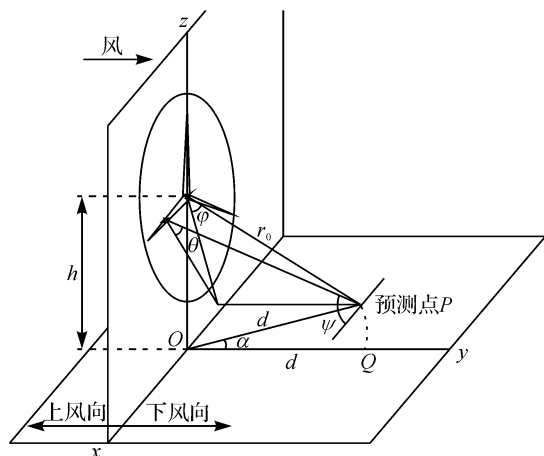


图 1 风电机组的噪声预测模型

Fig. 1 Wind turbine noise prediction model

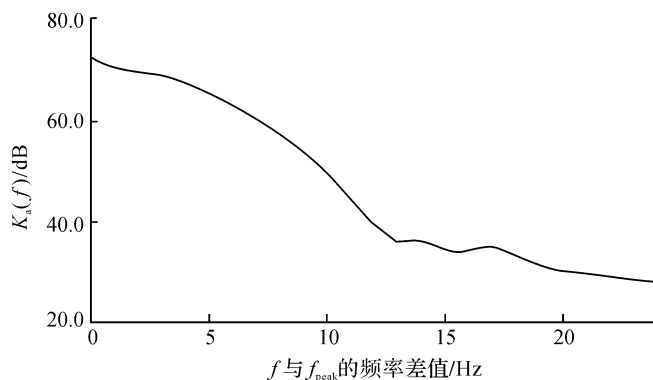


图 2 $K_a(f)$ 曲线

Fig. 2 $K_a(f)$ curve

$$L_{p2,1/3}(f) = 10\lg\left\{U^5 BD \frac{\delta l}{r_0^2} \left(\frac{S}{S_{\max}}\right)^4 \times \left[\left(\frac{S}{S_{\max}}\right)^{1.5} + 0.5\right]^{-4}\right\} + K_b, \quad (3)$$

式(3)中: $L_{p2,1/3}$ 为湍流边界层流动噪声1/3倍频程频带声压级,dB; U 为自由层气流速率,m/s; D 为气流指向性因子; δ 为湍流边界层厚度,m; l 为叶片单元的宽度,m; $S = f\delta/U$; S_{\max} 取值0.1; K_b 为修正值,取5.5 dB。

将上述两个声压级按频带相加,并进行A计权衰减,再把各频带的A声级叠加得到总A声级 L_A ,即

$$L_{p,1/3}(f) = 10\lg[10^{L_{p1,1/3}(f)/10} + 10^{L_{p2,1/3}(f)/10}], \quad (4)$$

$$L_{A,1/3}(f) = L_{p,1/3}(f) + \Delta A, \quad (5)$$

$$L_A = 10\lg\left[\sum_i 10^{0.1L_{A,1/3}(f_i)}\right]. \quad (6)$$

考虑风向、地面吸收衰减等因素,需在式(6)上进一步修正^[9]。

1.2 多台风电机组产生的噪声叠加

多台风电机组噪声叠加方法为

$$L_p = 10\lg \sum_{i=1}^N 10^{L_{pi}/10}. \quad (7)$$

式(7)中: L_p 为多个噪声源同时存在时该预测点的声压级,即叠加后的声压级,dB; L_{pi} 为某个风电机组的噪声贡献值,dB。背景噪声的叠加,也可以参照式(7)进行叠加计算。

2 基于 Matlab 的风电场噪声计算程序

在 Matlab 编程环境下,基于风电机组噪声预测模型开发了风电场噪声计算程序。该软件的主要功能是实现风电场等声级线图的绘制和敏感点的噪声计算。其中,风电场等声级线绘制又调用了若干子程序,程序流程见图3。

2.1 计算单台风电机组的两种噪声

依据图1风电机组的噪声预测模型,输入叶片数 B ,叶轮半径 R ,空气密度 ρ ,声速 C_0 ,叶片根部弦长 C_r ,地面类型 WTGS,风速 V_w ,风向 V-Alf,1/3倍频程中心频率 f 等参数。根据式(1),可求得预测点 P 的吸入湍流噪声1/3倍频程频带声压级 $L_{p1,1/3}(f)$ 。其主要程序代码如下:

```
r_2 = (x - xi)^2 + (y - yi)^2 + (z - zi)^2; % r_0 的平方
sinA = (y - yi)/sqrt(r_2); % sinφ
C07 = 0.7 * Cr; % C0.7
switch WTGS % 判断地面类型
    case{1}; I_ref = 0.16; % 山地
    case{2}; I_ref = 0.14; % 草地
    case{3}; I_ref = 0.12; % 平地
end
w = I_ref * (0.75 * Vw + 5.6); % 计算平均紊流强度 σ
R07 = 0.7 * R;
U07 = 2 * pi * R07 * n; % 计算 U0.7
it = Bn * sinA^2 * p * p * C07 * R * w^2 * U07^4 / r_2 / C0 / C0;
Lp1 = 10 * log10(it) + Kaf; % 计算吸入湍流噪声 Lp1
```

同样,输入叶片数 B ,风轮转速 n ,1/3倍频程中心频率 f 等参数。根据式(3),可求得预测点 $P(x,y,z)$ 的湍流边界层流动噪声1/3倍频程频带声压级 L_{p2} 。

2.2 计算单台风电机组的A声级

根据式(4)~(6),把上述2个声压级按频带相加,进行A计权网络运算,再把各频带的声级叠加,得到单台风电机组在预测点 $P(x,y,z)$ 的A声级。其关键代码如下:

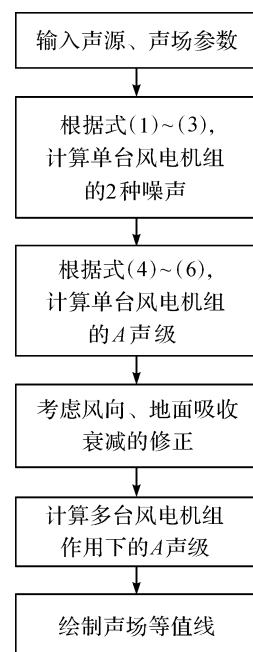


图3 程序流程图

Fig. 3 Program flow

```

f0=12.5; %选择 1/3 倍频程的基准频率 f0=12.5;
sum_P=0;
Ct=1.43;
for i=6:1:26 %对不同中心频率进行计算
    f=f0 * 2^(i/3);
    Lp1 = inflow_turbulence2(x,y,z,xi,yi,zi,Cr,R,n,Vw,f,Ct,WTGS); %调用 Lp1 子程序
    Lp2 = trailing_edge_interaction3(x,y,z,xi,yi,zi,R,n,Cr,s,f,Ct); %调用 Lp2 子程序
    Lp=10 * log10(10.^(Lp1/10)+10.^(Lp2/10)); %某个频率对应的声压级
    switch i %条件语句
        case {0}; Lpj=Lp-63.4; %某个频率对应的 A 计权声压级
            ~
        case {31}; Lpj=Lp-6.6;
        otherwise; Lpj=Lp-9.3;
    end
    sum_P=sum_P+10 * log10(1+10^((Lpj-sum_P)/10)); %把各频带的 A 声级叠加
end
La=sum_P; %得到预测点 P(x,y,z)的 A 声级

```

2.3 等声级线绘制和敏感点噪声预测计算

在环境噪声预测中,绘制声源的等声级线图,可以了解该建设项目(即声源)建成后受影响的人口分布、噪声超标的范围和程度,从而可以预先做好隔声、吸声等噪声防护措施,降低声源对周边人群的不利影响^[10]。在噪声预测时,也必须关注噪声影响区域的医院、学校和居民住宅区等敏感点的噪声值。

等声级线绘制是风电场噪声模拟计算程序中的主程序,其功能包括导入地图、设置声场范围、获取声源位置、调用计算声场中所有点的 A 声级、绘制等值线图,其程序流程图见图 3。其中,“计算声场中所有点的 A 声级”子程序,需调用“计算单台风电机组在某预测点 $P(x,y,z)$ 的 A 声级”。敏感点噪声预测计算程序可参考等声级线绘制程序。

等声级线绘制程序的关键代码如下:

```

[filename,pathname]=uigetfile({'*.jpg';'*.bmp'},'选择图片'); %选择地图
image(pic); %显示地图
hold on; %使得图形叠绘
[xgin,ygin]=ginput; %获取声源位置
gxy=[xgin,ygin];
for i=1:1:N %对 N 个声源产生的声压做循环累计
    A=gxy(i,:); %提取声源坐标值
    xi=A(1,1);yi=A(1,2); %获取声源横坐标 xi,纵坐标用 yi 表示
    Li= point_sound_all(xm,ym,z,xi,yi,zi,Cr,R,Vw,n,s,WTGS,V_Alf);
    %调用声场所有点的声压计算子函数,括号内为声场范围、声源参数
    pi2=Po_2 * (10.^(Li/10)); %由 Li 求 pi^2
    p2=p2+pi2; %由 pi^2,求(p 总)^2
end
Lp=10 * log10(p2/Po_2); %计算 N 个声源叠加后的总声压级
La=Lp+10 * log10(1+10.^(La-Lp)/10)); %考虑背景噪音后的声压级
h1=contour(La,'DisplayName','L'); %画等值线

```

3 图形用户界面(GUI)设计

为了便于用户使用,在 M 程序的基础上,进一步利用 Matlab 的 GUIDE 交互界面开发工具,设计了风电场声场模拟的图形用户界面(GUI)。

3.1 功能描述

设计的图形用户界面分为以下几个模块:

- 1) 参数输入,导入地图,输入风电场的声源、声场的各种参数;
- 2) 执行命令,绘制曲线、清除参数和曲线;
- 3) 显示窗口,主要显示绘制的等声级线、显示风电机组的位置;
- 4) 敏感点计算,计算敏感点的声压值。

3.2 界面设计

界面设计如图 4 所示,界面主要分为菜单栏、声场图、参数表和敏感点声压级计算 4 个区域。在界面设计的同时,需要编辑各控件的回调函数,以便界面能真正运行。现举 3 例:

“声源设置”的“叶轮半径(m)”,包含一个文本编辑框。该文本框的作用是实现风电机组风轮半径 R 的输入,其程序代码:`R=str2num(get(handles.edt_R,'string'));` %读取字符串并转换为数值类型。这样,就实现了风电机组叶轮半径 R 的输入。

“绘制声场”控件,需右击该控件,在弹出菜单中选择 Callback 函数,把“等声级线绘制主程序”的程序代码粘贴上去。

“设置预测点”控件,需在其 Callback 函数中输入如下代码:

```
[xgin2,ygin2]=ginput(1); %鼠标点击当前坐标系的某个预测点,并返回该点的 x,y 坐标  
plot(xgin2,ygin2,'k^'); %在图上做预测点的标志,黑色三角形  
set(handles.edt_x,'string',num2str(round(xgin2))); %显示预测点 x,y 坐标  
set(handles.edt_y,'string',num2str(round(ygin2)));
```

3.3 程序执行和使用

如图 4 所示,预先导入地图,并输入风电场的声源、声场的各种参数,在地图上设置 2 个风电机组声源后,点击“绘制声场”命令后,显示窗口显示了声场等值线图。图 4 显示了 2 个风电机组声源作用下的声场等声级线图形。

对噪声敏感点进行预测时,可以鼠标点击敏感点在地图中的位置,再点击“计算”,即可计算出敏感点的声压级。如图 4 声场图中的 Δ 标志即为敏感点,该点的坐标(1 323,1 230,1.5),该点的 A 声级为 56.5 dB。

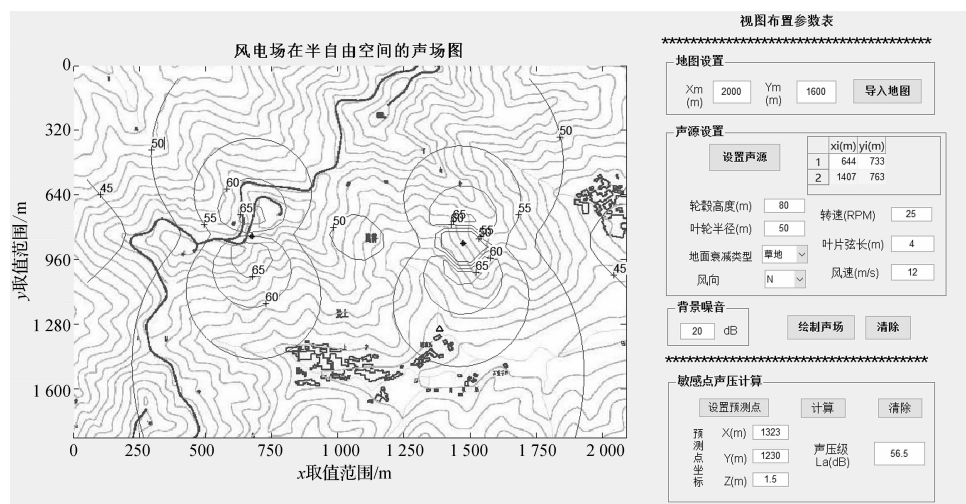


图 4 风电场声场模拟的图形用户界面

Fig. 4 Graphical user interface of wind farm noise simulation

4 实验验证

为验证软件的可靠性,依据风电机组的噪声测试规范^[10-11],对浙江省内两个风电场的风电机组噪声进行了监测,表 1 给出了各风电机组参数。

根据本程序计算的噪声预测结果与噪声实测结果见表 2。由表 2 可知,依据预测模型得到的数值与实测结果比较接近,两者差值都在 ± 3 dB 范围内。

表 1 风电机组参数

Table 1 Parameters of wind turbines

风电机组 序号	额定功率/ kW	风轮直径/ m	轮毂高度/ m	桨叶数	驱动方式	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	叶片转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	750	49	50	3	变桨距	6	20
2	2 000	80	67	3	变桨距	6	13

表 2 噪声模型预测值与实测值

Table 2 Predicted values of the model and surveying values

风电机组 序号	风轮直径 $2R/\text{m}$	测点距风电机组 水平距离 d/m	模型预测值 L_A/dB	实测值 $L_{Aeq,1\text{min}}/\text{dB}$	二者差值 $\Delta L_A/\text{dB}$
1	49	50	54.9	55.2	-0.3
		100	52.7	50.0	2.7
		150	50.1	47.8	2.3
		200	47.0	44.7	2.3
		250	44.4	43.2	1.2
2	80	67	50.1	51.0	-0.9
		100	49.4	49.8	-0.4
		136	48.0	47.0	1.0
		174	45.9	45.4	0.5

5 结 语

基于 NASA 提出的风电场噪声预测模型的改进版,采用 Matlab 语言编写了风电场的声环境模拟计算程序,并设计了相应的 GUI 程序。该程序能实现风电场声场等声级线图的绘制和噪声敏感点的噪声预测,有利于风电场的科学选址和风电机组的规范布局。所设计的 GUI 简单实用且交互界面友好,便于用户使用,从而为具有不同地面类型(山地、草地、平地)风电场的设计、模拟和计算机优化提供了一种有效的工具。

参考文献:

- [1] PEDERSEN E, HALMSTAD H. Noise annoyance from wind turbines[R]. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency Report, 2003.
- [2] KUWANO S, YANO T, KAGEYAMA T, et al. Social survey on wind turbine noise in Japan[J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, 62(6): 503.
- [3] SON E, KIM H, KIM H, et al. Integrated numerical method for the prediction of wind turbine noise and the long range propagation[J]. Current Applied Physics, 2010(10): S316.
- [4] 张磊,毕靖,郭莲英. MATLAB 实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008: 1-2.
- [5] HUBBARD H H, SHEPHERD K P. Wind turbine acoustics[R]. Hampton: NASA, 1990.
- [6] HUBBARD H H, SHEPHERD K P. Aeroacoustics of large wind turbines[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(6): 2495.
- [7] 翟国庆,徐婧,郑玥,等. 风电机组噪声预测[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 929.
- [8] 余金,何山,程静,等. 结合回归分析与改进 GA-SVR 的风机噪声预测[J]. 中国科技论文, 2015, 10(23): 2805.
- [9] 环境保护部. 环境影响评价技术导则:声环境 HJT2.4-2009[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2009.
- [10] Wind turbine generator systems-Part 11: Acoustic noise measurement techniques; IEC 61400-11 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [11] 中华人民共和国发展改革委员会. 风电场噪声限制及测量方法:DL/T 1084-2008[S]. 北京:中国电力出版社, 2008.