

基于 MANATEE 转子斜级优化噪声分析

吴炜桦 何彪 王少勃

MANATEE 软件是由法国 EOMYS 公司研发的,可以计算电机的电磁振动噪声的软件。北京天源博通科技有限公司是该软件在中国的代理商。

本文主要是利用 MANATEE 软件分析转子斜级对电机电磁噪声的影响,以丰田 Prius2004 款电机为例。

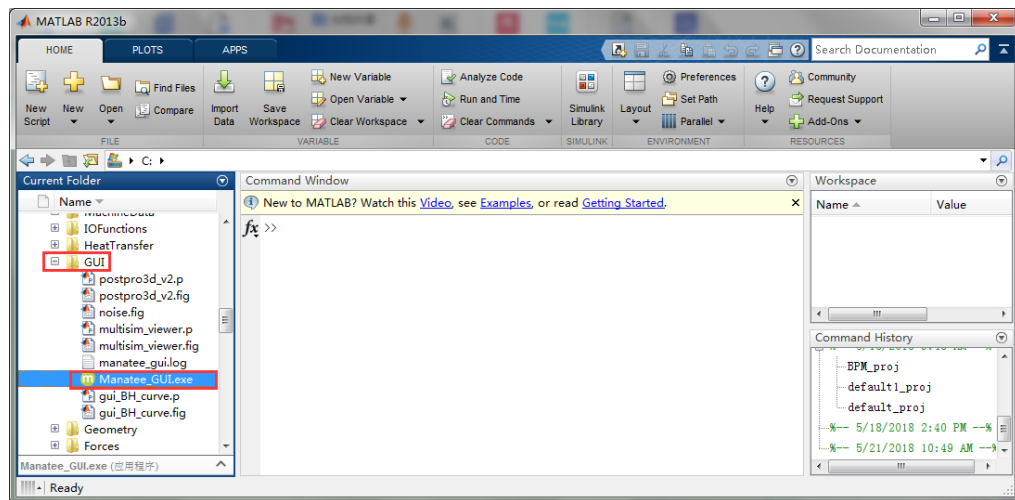
表 1 是丰田 Prius2004 电机的主要尺寸参数。

表 1 电机主要的参数

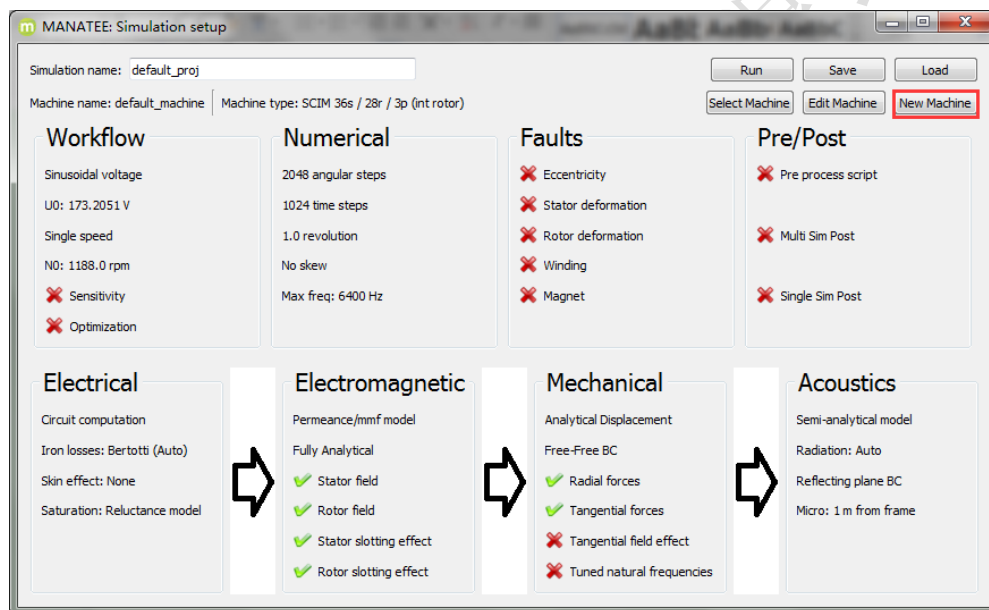
名称	数据
定子外径/mm	269.24
定子内径/mm	161.9
气隙长度/mm	0.75
铁心长度/mm	83.82
转轴外径/mm	110.64
极数/槽数	8/48

一、建立模型

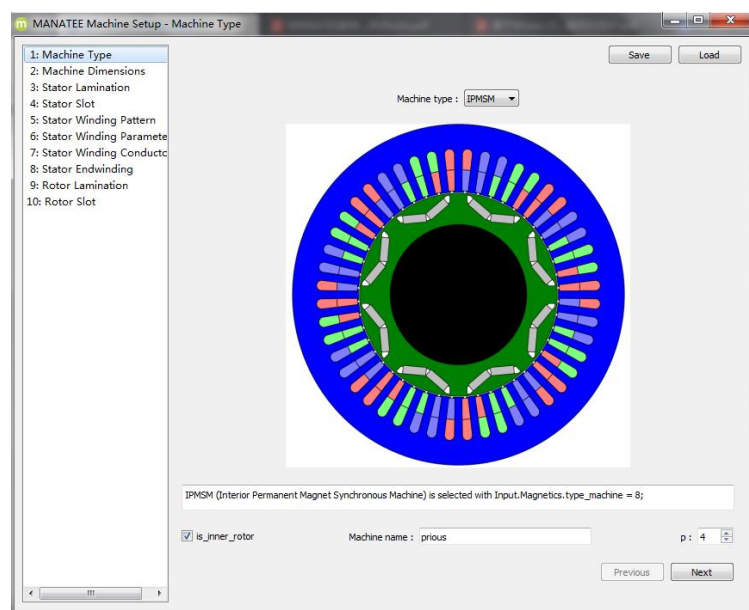
首先打开 Manatee 软件。如下图所示。



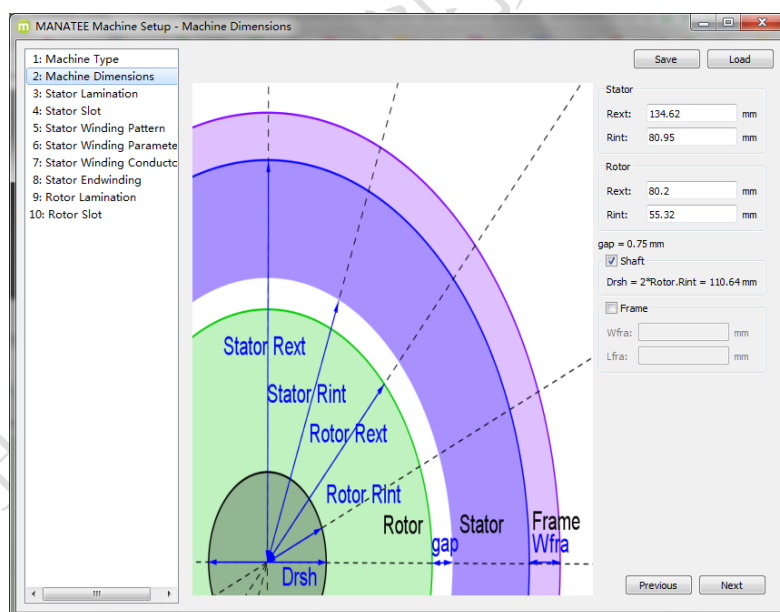
选择电机类型，点击 New Machine 按钮，选择要编辑的电机类型。



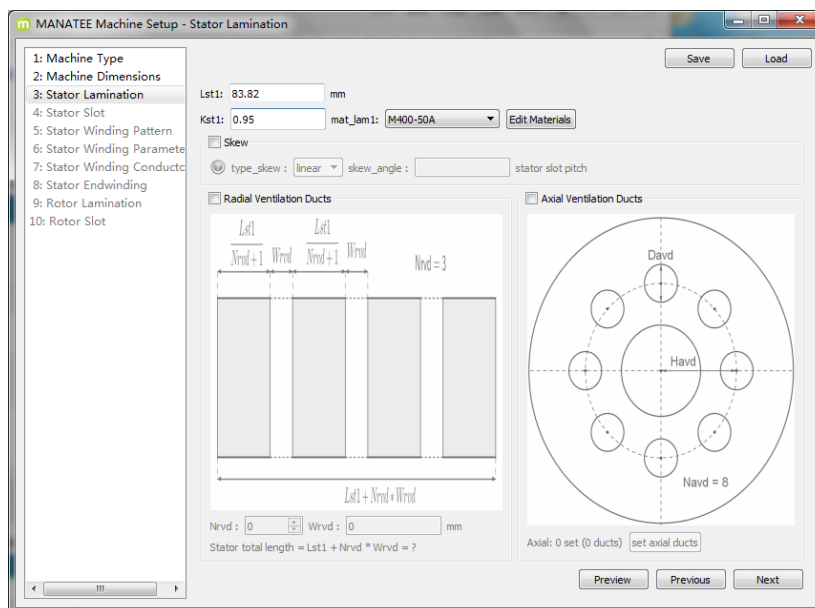
在电机类型里面选择 IPMSM，为内置式的永磁电机类型。P 中输入极对数为 4（注意这里是极对数不是极数）。



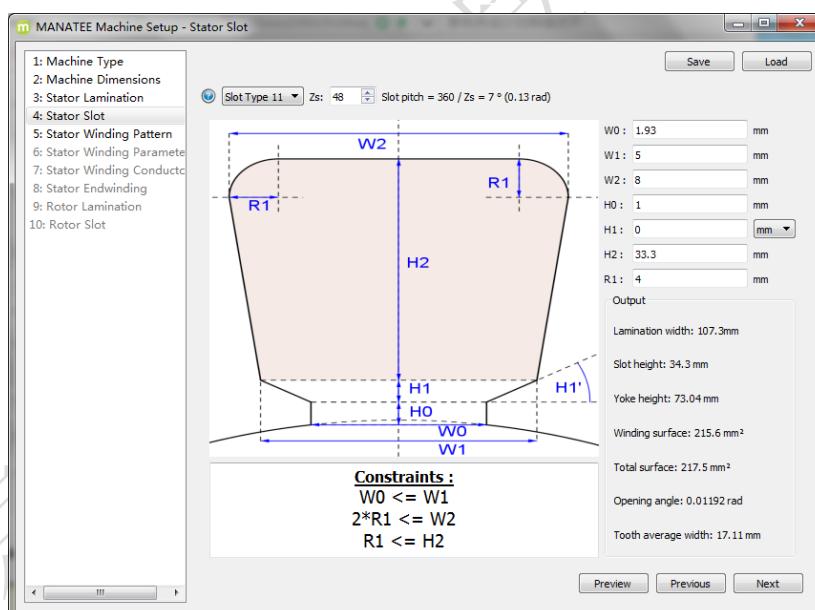
接着设置 Machine Dimensions 选项，在这里设置电机的定子外半径为 134.62mm, 定子内半径为 80.95mm, 转子外半径 80.2mm, 转子内半径为 55.32mm。计算出气隙长度为 0.75mm。



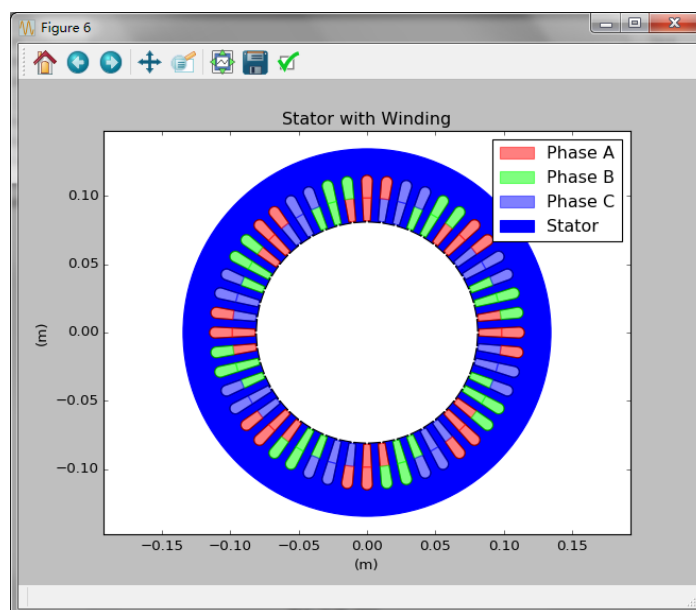
设置定子轴向长度，定子硅钢片轴向长度为 83.82，硅钢片的叠压系数设置为 0.95。没有径向通风道和轴向通风口。



设置定子槽型，软件提供了多种槽型，选择相应的槽型进行设置。在这里选择槽型 11，以下为具体的槽型尺寸参数。

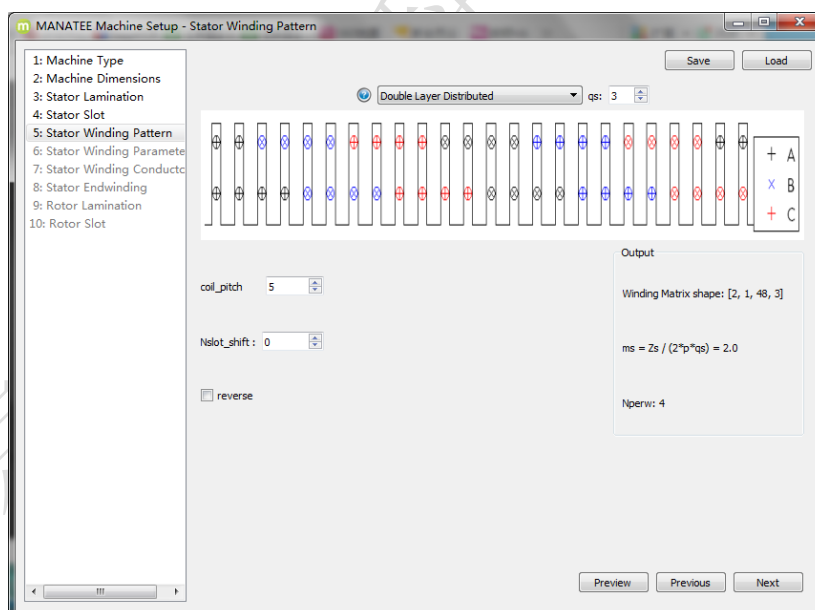


当设置好后，可以点击 Preview 按钮，生成如下图所示。

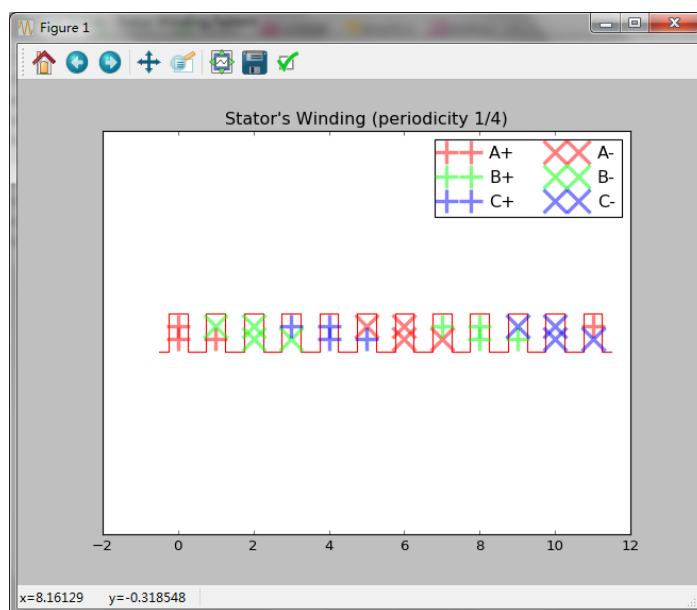


定子绕组设置，Prius 2004 为 3 相双层，分布短距，绕线间距为 5，并绕根数 13，并联之路数 1，每线圈的串联匝数 9。

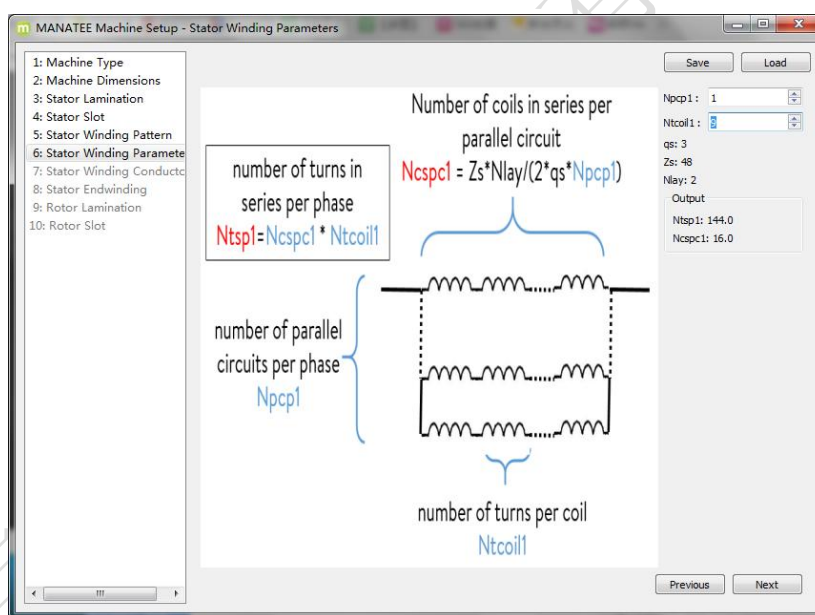
点击 next 按钮，选择 3 相双层，绕组跨距为 5。



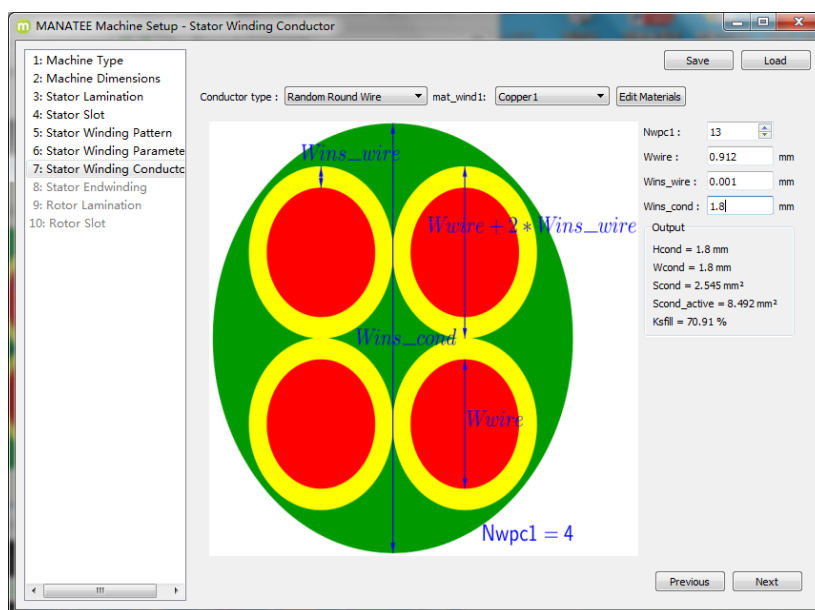
点击 Preview 按钮，生成如下图所示。



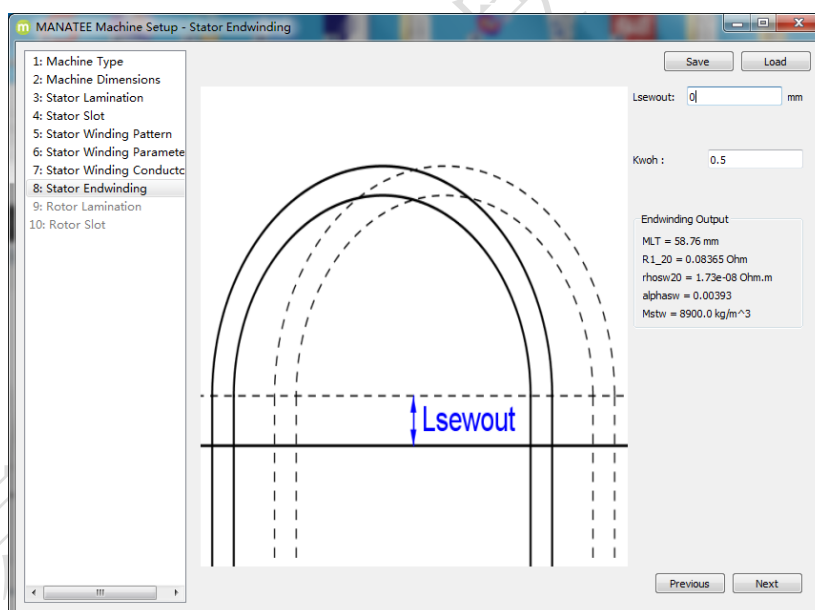
点击 next 按钮，设置并联之路数 1， 每线圈的串联匝数 9。



点击 next 按钮，选择圆导线，材料选择铜，并绕根数 13，设置线径 0.912mm。



点击 next 按钮，设置端部绕组。设置端部绕组直线伸出长度为 0，端部调整系数为 0.5。

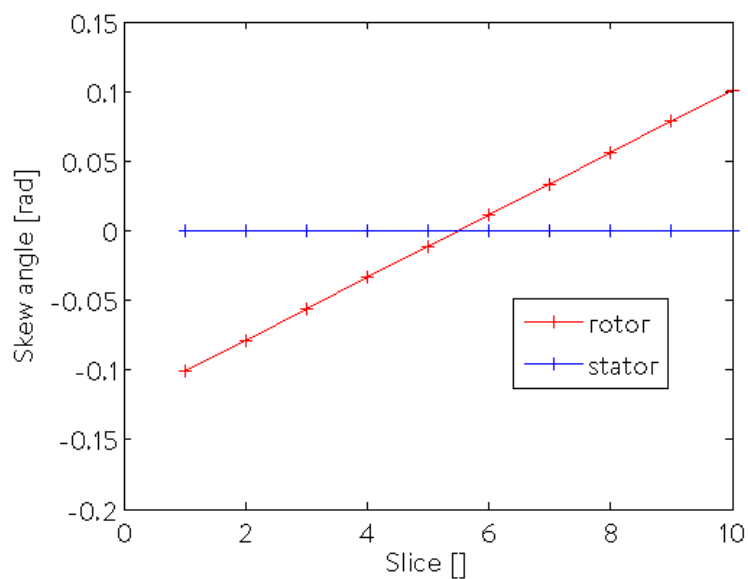


点击 next 设置转子，转子硅钢片长度为 83.82mm，硅钢片的叠压系数为 0.95，硅钢片材料属性为 M400-50A，勾选 Skew，设置斜级。

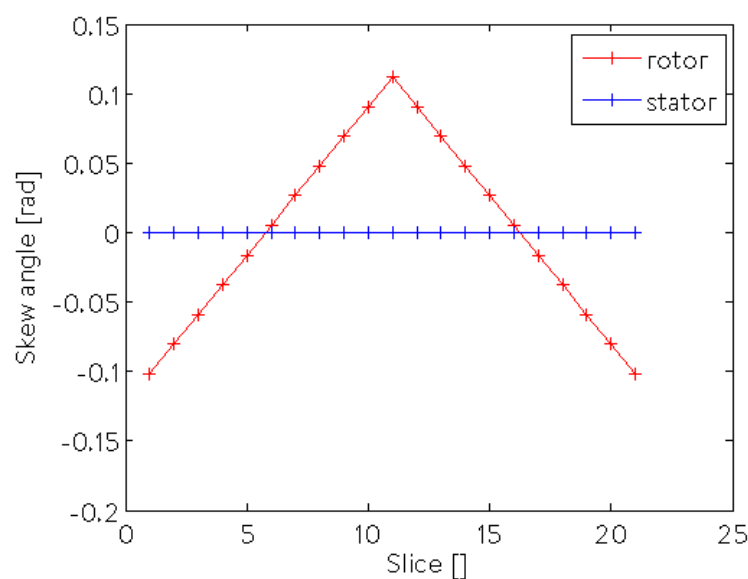
注意这里斜级有 3 种方式，以斜级率表示偏斜程度（斜级率以定子槽间距表示）：

1. Linear: 线性斜级

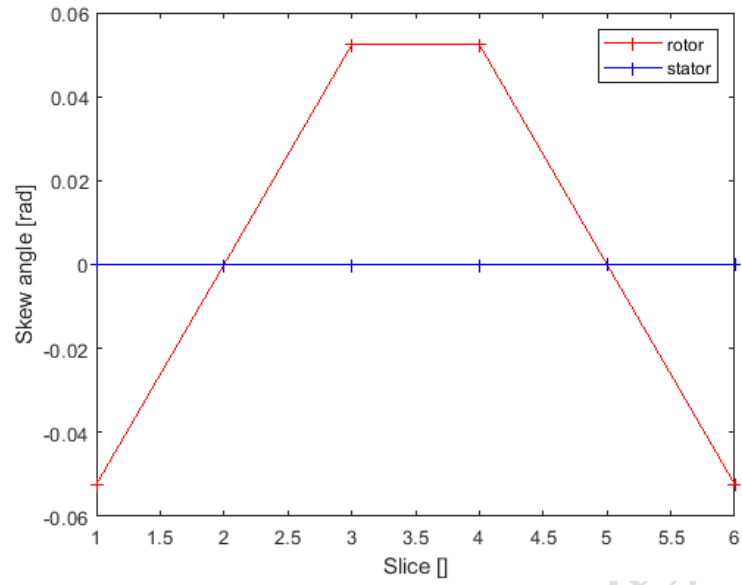
如图所示：



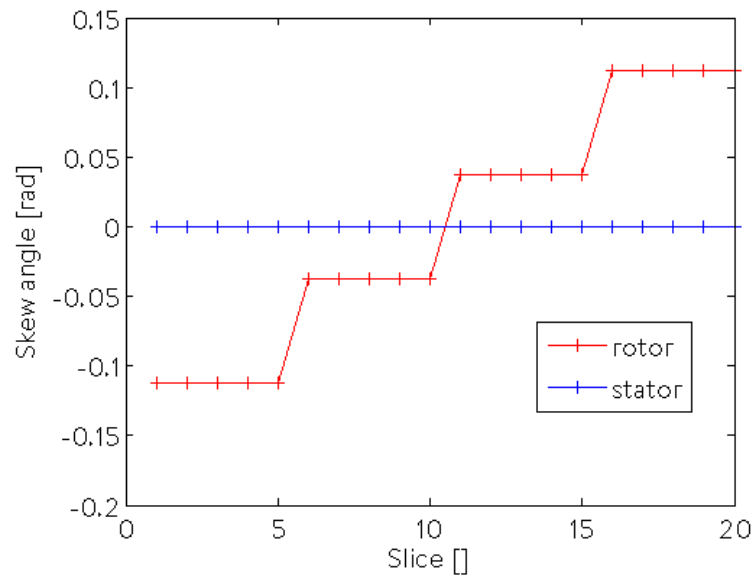
2. Herringbone:人字形斜级



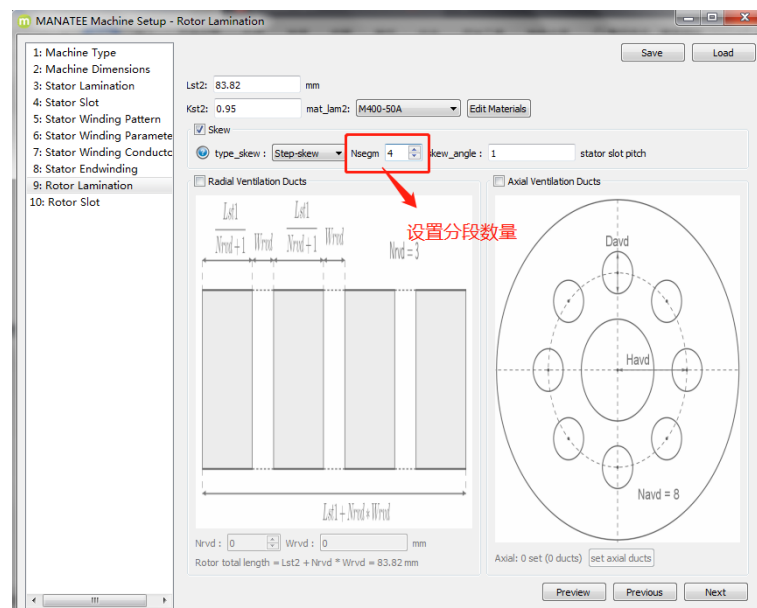
注意，这里在设置轴向切片（后文表明位置）数量时，要设置为不均匀数量，这样可以确保倾斜角度达到最大值，便于后期噪声计算。假设设置为均匀数量（假设设置为 6），则倾斜形状无法形成人字形，造成倾斜偏差，噪声计算出现严重误差。如图所示：



3. 分段常数斜级



注意，在选择分段常数偏斜，设置界面中需要设置分段数量（Nsegm），如图所示：



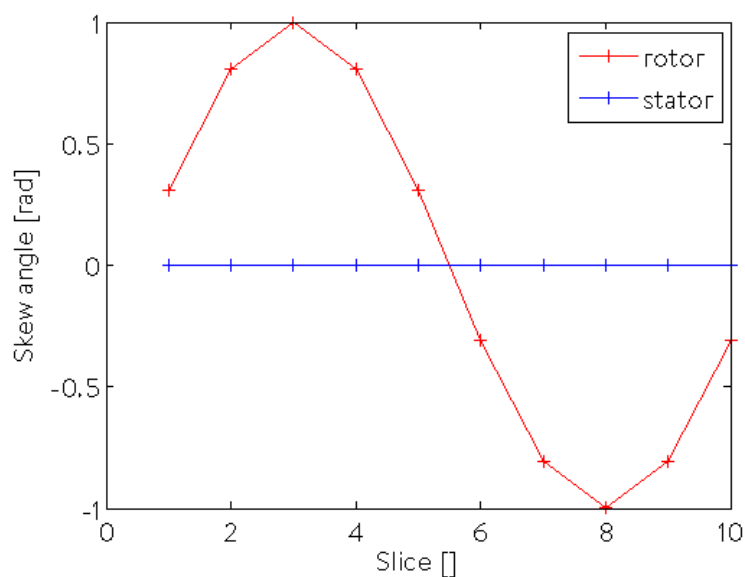
4. 自定义斜级

在 MANATEE 中也可以自己定义斜级形式，这里需要我们在程序中设置响应形状的函数关系式，如图所示：

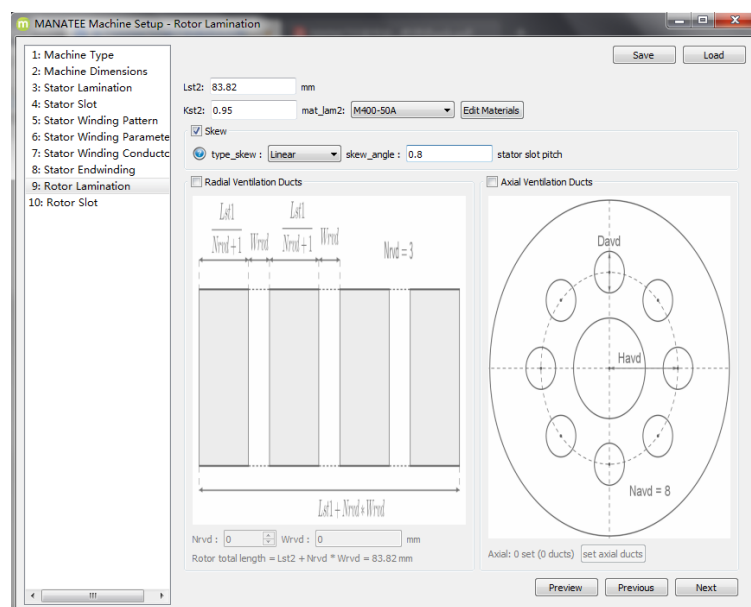
```
Input.Geometry.type_skew_geoR = 3;
```

```
Input.Geometry.skew_curver sin(2*pi/350e-3*linspace(0,350e-3,100));
```

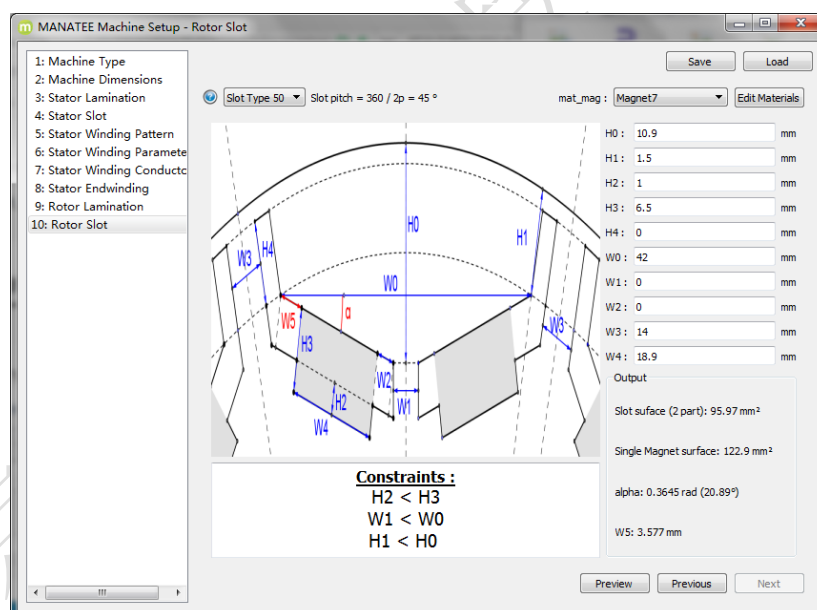
```
% With Input.Geometry.Lst2 = 350e-3;
```



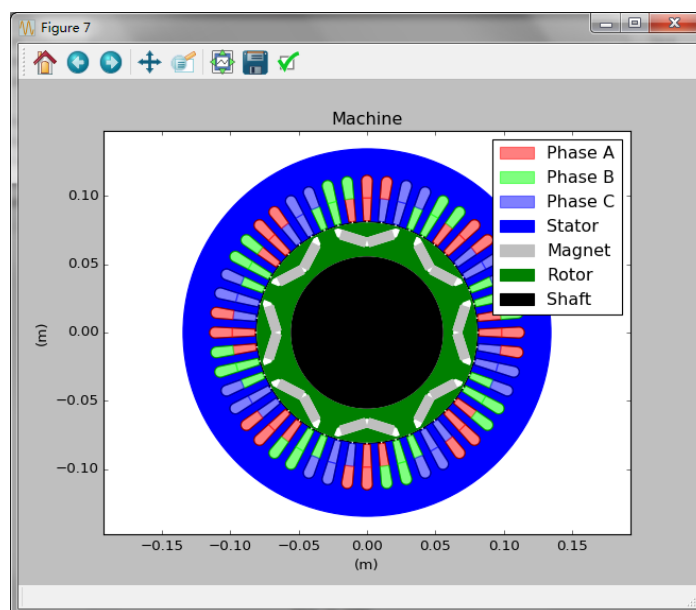
这里应用线性偏斜，设置 Linear，设定斜级为 0.8 个定子槽间距，如图所示：



点击 next 按钮，设置永磁体尺寸，选择永磁体槽型为 slot Type 50，具体尺寸按着下面图形输入，永磁体材料为 magnet7.



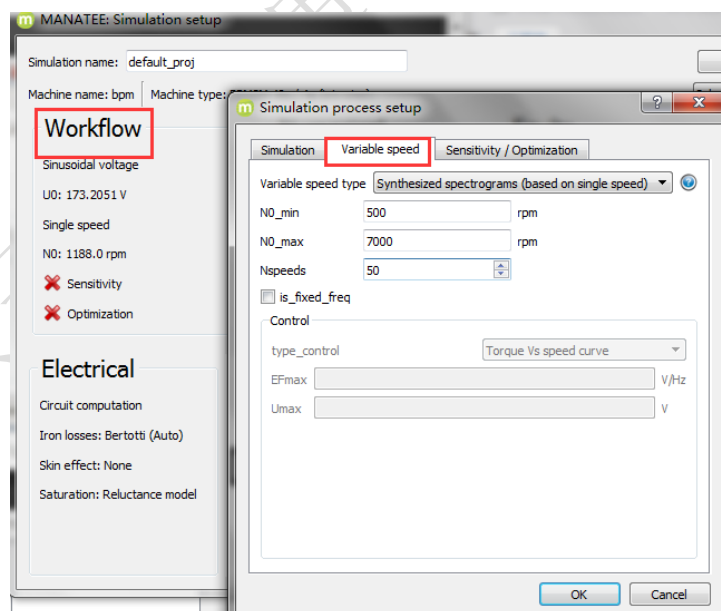
点击 preview 按钮，生成如下所示的图形。



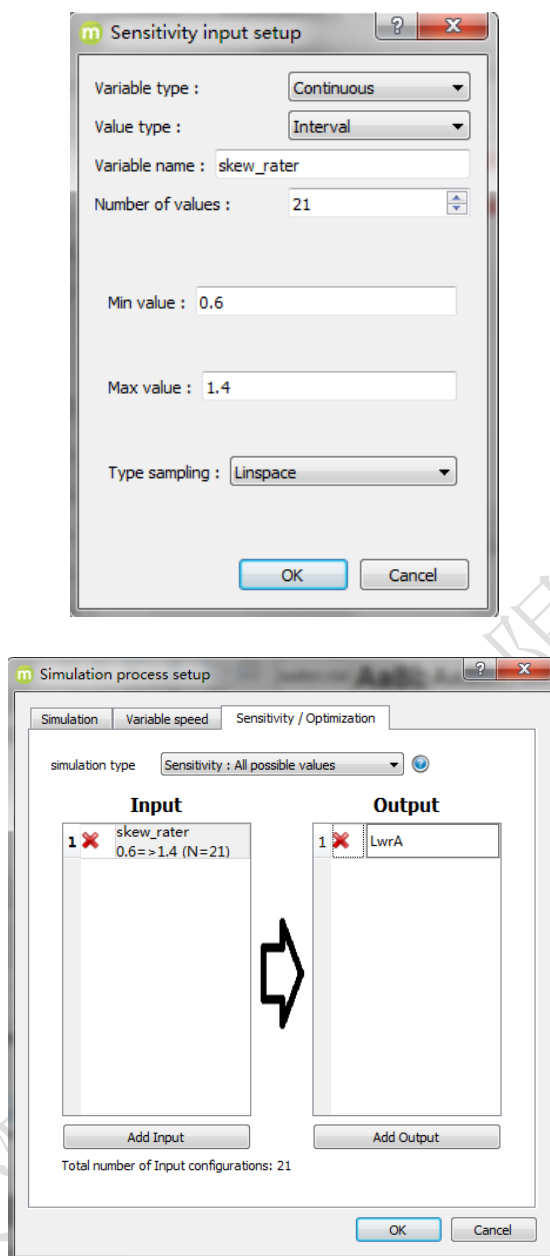
当全部建完后，点击保存按钮，把新建的电机模型保存下来。

2 设置敏感分析

点击 Workflow—> Variable speed 设置变速，最小转速是 500，最大 7000，步长为 50。



设置变量因素 skew_rater，设置斜率变化范围 0.6-0.14，设置输出变量：变声功率级（理想声波图），如图所示：

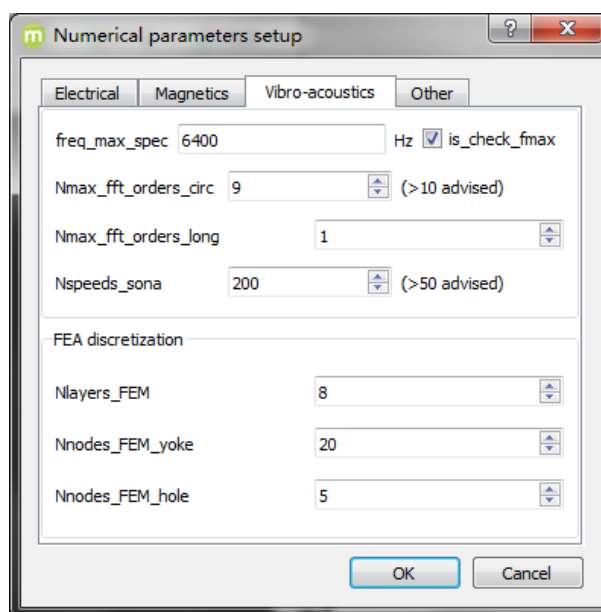


数值参数模型设置，点击 Numerical 按钮。

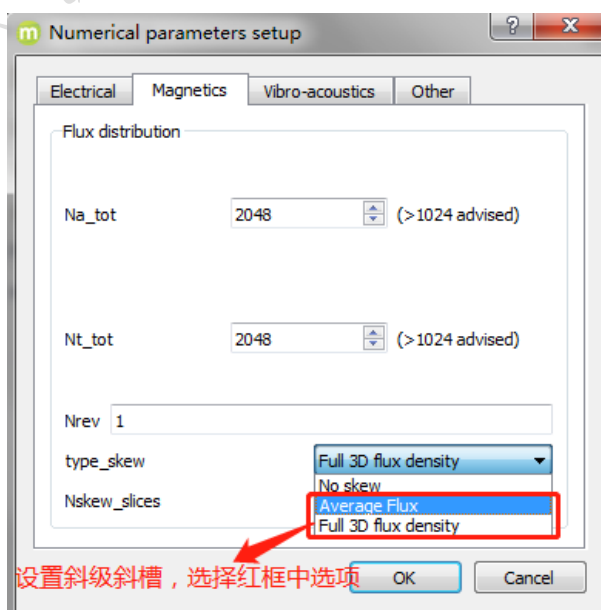
这部分包含了模拟的所有数值参数。MANATEE 包含几个检查和警告，以确保模拟结果是数字的。

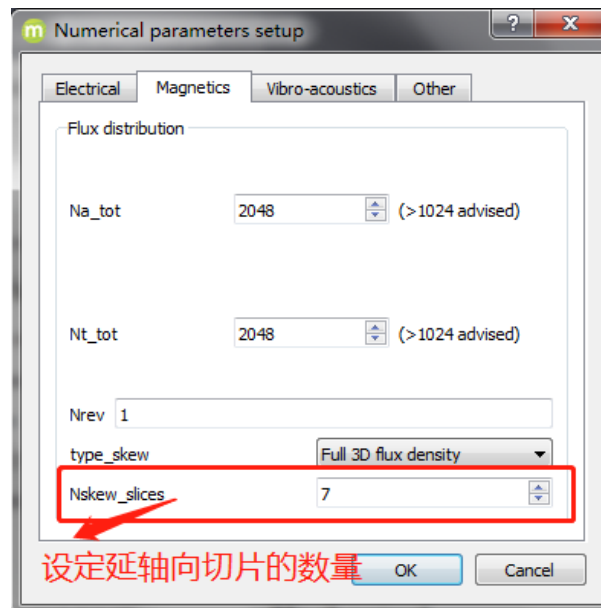
一个重要的输入变量是在振动计算过程中要考虑的最大振动频率。它应该根据电机中观察到的最高的“危险”自然频率，以及最高的磁激发频率（例如，PWM 操作的开关频率的两倍，以及正弦操作的槽口频率的 4 倍）来选择。小型电机将具有高频模式，因此需要较高的采样频率。如果指定的最大频率与理论磁激发频率不一致，则输出中出现一条警告消息。

在数值组/振动-声设置里，周向振动波数的最大数目被设置为 9，这意味着磁激发波数为 0、1、2 直到 8 在结构模拟中被考虑在内。根据轭的刚度和槽数，你可能需要包括多达 20 个波数（一个大型多极同步发电机的例子）来正确地模拟主振动波。为了包含极对数的空间频率最大的振动波，这个参数应该至少是 $2p+1$ ，如果不是这种情况，就会发出警告信息。



应该确保数值离散化程度足够高，在一个转子机械周期中有 2 的 11 次幂个点，沿著气隙的 2 的 11 次幂个点。此电机斜极。设置如图：



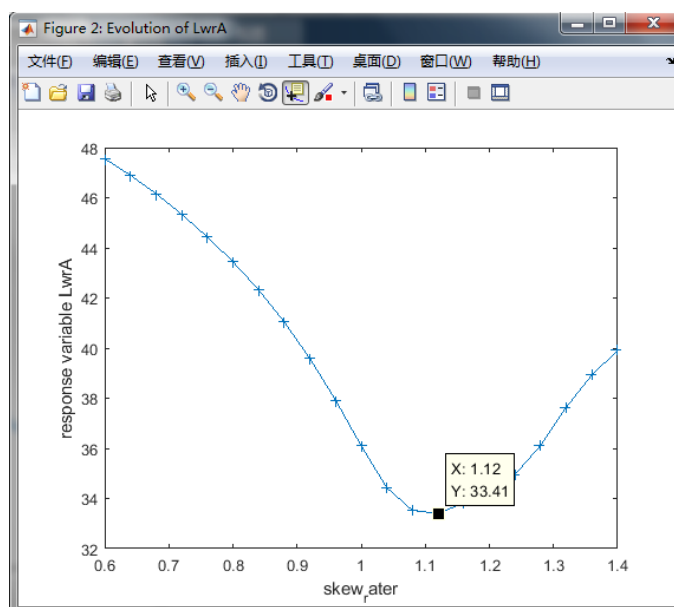


电气、电磁、机械、噪声等模块正常设置即可。

设置完成后，计算模型。计算结果如图所示：

```
[MANATEE/MULSIM] Running multiple simulations...
1/21 simulation done, X=0.6, F(X)=47.55614 -375.3492 and G(X)=
2/21 simulation done, X=0.64, F(X)=46.8985 -380.2354 and G(X)=
3/21 simulation done, X=0.68, F(X)=46.16142 -385.6271 and G(X)=
4/21 simulation done, X=0.72, F(X)=45.34157 -391.5668 and G(X)=
5/21 simulation done, X=0.76, F(X)=44.43798 -398.1024 and G(X)=
6/21 simulation done, X=0.8, F(X)=43.44612 -405.2875 and G(X)=
7/21 simulation done, X=0.84, F(X)=42.32861 -413.1829 and G(X)=
8/21 simulation done, X=0.88, F(X)=41.04466 -421.8568 and G(X)=
9/21 simulation done, X=0.92, F(X)=39.58632 -431.3869 and G(X)=
10/21 simulation done, X=0.96, F(X)=37.92428 -441.8613 and G(X)=
11/21 simulation done, X=1, F(X)=36.10269 -453.3805 and G(X)=
12/21 simulation done, X=1.04, F(X)=34.4262 -466.0595 and G(X)=
13/21 simulation done, X=1.08, F(X)=33.5236 -480.0308 and G(X)=
14/21 simulation done, X=1.12, F(X)=33.4058 -495.4474 and G(X)=
15/21 simulation done, X=1.16, F(X)=33.82318 -512.4869 and G(X)=
16/21 simulation done, X=1.2, F(X)=34.29299 -531.3569 and G(X)=
17/21 simulation done, X=1.24, F(X)=34.95225 -552.3008 and G(X)=
18/21 simulation done, X=1.28, F(X)=36.1216 -575.6068 and G(X)=
19/21 simulation done, X=1.32, F(X)=37.64464 -601.6173 and G(X)=
20/21 simulation done, X=1.36, F(X)=38.92831 -630.7432 and G(X)=
21/21 simulation done, X=1.4, F(X)=39.91011 -663.4805 and G(X)=
```

优化计算数据



由图可知，使电磁激励的声学噪声和振动最小化的偏斜是在 1.12 个槽间距处。

将斜级率设置为 0.8 与 1.12，计算结果对比，噪声具有明显的降低，如图所示

```

命令窗口
Stator mode (7,0): f=4878 Hz, ksi=2 %
Stator mode (8,0): f=5798 Hz, ksi=2 %
Total vibration power level Lvib: 89.2642 dB

Radiating surface: 0.070899 m^2
Directivity factor: 2
Microphone position: 1 m / 1.1346 m away from source surface / center
Acoustic wavelength at 950.4 Hz (highest SPL at N0=1188 rpm): 0.36143 m
A-weighted sound power level LwrA at N0=1188 rpm: 43.4461 dBA
A-weighted sound pressure level LpA at N0=1188 rpm: 34.3673 dBA
Maximum A-weighted sound power level LwrA_max at variable speed based on spectrogram synthesis from N0=500 to 7000 rpm: 85.1446 dBA
[MANATEE/MULISIM] Number of configurations:21
[MANATEE/MULISIM] Maximum computational time:47.2908 s
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[MANATEE/MULISIM] Running multiple simulations...
1/21 simulation done, X=0.6, F(X)=47.55614 -375.3492 and G(X)=
2/21 simulation done, X=0.64, F(X)=46.8985 -380.2354 and G(X)=
3/21 simulation done, X=0.68, F(X)=46.16142 -385.6271 and G(X)=
4/21 simulation done, X=0.72, F(X)=45.34157 -391.5668 and G(X)=
5/21 simulation done, X=0.76, F(X)=44.43798 -398.1024 and G(X)=
6/21 simulation done, X=0.8, F(X)=43.44612 -405.2875 and G(X)=

```

斜级率设置 0.8 槽间距结果


```
命令窗口
Total vibration power level Lvib: 86.9197 dB

Radiating surface: 0.070899 m2
Directivity factor: 2
Microphone position: 1 m / 1.1346 m away from source surface / center
Acoustic wavelength at 475.2 Hz (highest SPL at N0=1188 rpm): 0.72285 m
A-weighted sound power level LwA at N0=1188 rpm: 33.4058 dBA
A-weighted sound pressure level LpA at N0=1188 rpm: 24.327 dBA
Maximum A-weighted sound power level LwA_max at variable speed based on spectrogram synthesis from N0=500 to 7000 rpm: 63.7832 dBA
[MANATEE/MULTISIM] Number of configurations:21
[MANATEE/MULTISIM] Maximum computational time:57.2448 s
*****
[MANATEE/MULTISIM] Running multiple simulations...
1/21 simulation done, X=0.6, F(X)=47.55614 -375.3492 and G(X)=
2/21 simulation done, X=0.64, F(X)=46.8985 -380.2354 and G(X)=
3/21 simulation done, X=0.68, F(X)=46.16142 -385.6271 and G(X)=
4/21 simulation done, X=0.72, F(X)=45.34157 -391.5668 and G(X)=
5/21 simulation done, X=0.76, F(X)=44.43798 -398.1024 and G(X)=
6/21 simulation done, X=0.8, F(X)=43.44612 -405.2875 and G(X)=
7/21 simulation done, X=0.84, F(X)=42.32861 -413.1829 and G(X)=
8/21 simulation done, X=0.88, F(X)=41.04466 -421.8568 and G(X)=
9/21 simulation done, X=0.92, F(X)=39.58632 -431.3869 and G(X)=
10/21 simulation done, X=0.96, F(X)=37.92428 -441.8613 and G(X)=
```

斜级率设置 1.12 槽间距结果