

# Research on the Influence of Structural Parameters of Denitration Grid Layer Ash Deposition on the Radiation Characteristics of Exponential Acoustic Jet Sootblower Horn Sound Source

Yi Zhao<sup>1</sup> Libo Cheng<sup>1</sup> Jinwen Lu<sup>1</sup> Yanfeng Yang<sup>2</sup> Xiaoliang Xue<sup>3</sup>

1. Guoneng Zhijin Power Generation Co., Ltd., Bijie, Guizhou, 552100, China

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan, 4100072, China

3. Shaanxi Dainan New Energy Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710075, China

## Abstract

In this paper, based on the problem of ash accumulation and blockage in the denitration grid layer of power plant, the diffuser of acoustic soot blower is studied, and the sound energy and sound pressure level are improved by using the cylinder. The effects of different length, meandering index and throat diameter on the radiation characteristics of pneumatic sound source are calculated by finite element method. The results show that: When the driving frequency is 200 Hz and the sound pressure is 10Pa, the sound pressure level generated when the horn throat diameter is 0.18m is the largest, up to 108.7dB; the sound pressure level generated when the meander index is 4 is the largest, up to 108.9dB; the sound pressure level generated when the horn length is 0.9 m is the largest, up to 106.1dB. According to the formula, the sound pressure level produced when the horn length is 1.8m can reach 164dB.

## Keywords

pneumatic sound source; trumpet; meandering index; sound pressure level

# 脱硝格栅层积灰结构参数对指数型声波射流吹灰器喇叭声源辐射特性的影响研究

赵义<sup>1</sup> 成丽波<sup>1</sup> 芦金文<sup>1</sup> 杨延锋<sup>2</sup> 薛晓亮<sup>3</sup>

1. 国能织金发电有限公司, 中国·贵州毕节 552100

2. 长沙理工大学, 中国·湖南长沙 410007

3. 陕西岱南新能源工程有限公司, 中国·陕西西安 710075

## 摘要

论文基于电厂脱硝格栅层部位积灰堵塞问题, 研究声波吹灰器的扩音器, 又称号筒提高声能量和声压级。利用有限元方法计算了不同长度、蜿蜒指数、喉直径等参数对气动声源辐射特性的影响。计算结果表明: 在驱动频率为200Hz及声压为10Pa时, 喇叭喉部直径取0.18m时产生的声压级最大, 可达108.7dB; 蜿蜒指数取4时所产生的声压级最大, 可达108.9dB; 喇叭长度取0.9m时所产生的声压级最大, 可达106.1dB。根据公式计算得出喇叭长度在1.8m时所产生的声压级可达164dB。

## 关键词

气动声源; 喇叭; 蜿蜒指数; 声压级

## 1 引言

目前电厂多燃用高硫、高灰、高碱金属煤种, 导致烟气含灰量巨大, 灰的粘性增强, 更易导致脱硝前后各水平烟道、导流板、整流格栅、催化剂等设备的积灰问题, 严重影响脱硝系统正常运行, 增加烟道阻力, 导致引风机出力增

加, 甚至导致机组带负荷的能力下降, 如能成功解决 SCR 脱硝积灰问题, 降低脱硝系统阻力, 提高脱硝系统流场均匀性, 减少局部氨逃逸过量, 减轻空预器即除尘设备的积灰, 可大幅降低电厂运行成本, 提高机组带负荷能力, 保证电厂安全经济运行。本项目以脱硝整流格栅积灰为研究对象, 研究高灰、高碱金属煤种燃烧过程中脱硝装置进口烟道设备、导流板积灰等长期存在的一系列痛点问题, 开发低频强声脉冲冲炮利用压缩空气以脉冲波的形式作用于堵塞位置, 形成的声辐射压力和非线性声流可以有效疏通堵塞位置并清洁积

【作者简介】赵义(1992-), 中国河北保定人, 本科, 助理工程师, 从事热力发电研究。

灰。保证燃用高灰、高碱金属锅炉脱硝设备的少积灰，提高机组带负荷能力，降低电厂的运行成本。开发一套大功率声波吹灰器解决目前的困难。声波吹灰器重要的组成部分就是号筒，号筒别名喇叭，是气动声源的重要组成部分，一般有锥形喇叭、指数喇叭和双曲型喇叭三种类型<sup>[1]</sup>。号筒可将气动声源发生装置所产生的声波有效放大，经号筒传输后的声波可用于工业吹灰<sup>[2]</sup>。为了获得更好的吹灰效果，通过优化号筒形状带来声压级的提升，成为当下研究的热点。王鹏<sup>[3]</sup>对比了不同长度、不同蜿蜒指数以及不同喇叭口半径工作在最佳频率下所能产生的最大声压级，结果表明蜿蜒指数越小声压级越大。白春华通过选用不同型号的直管谐振管与双曲喇叭进行辐射特性的对比，发现直管型谐振管由于受激波的影响其声辐射效果远不如双曲喇叭，但其并没有进一步探究改变双曲喇叭参数后声辐射特性将有何变化。Kaidong 利用有限元软件建立不同形状喇叭的二维轴对称模型，分析了喇叭不同截面形状对远场声压级和指向性的影响。论文利用 COMSOL 有限元软件，针对目前应用较多的指数型号筒，探究其在不同的结构参数下发声性能的优劣，并以控制变量的方式找出单一因素作用下号筒所能产生的最大声压级。

## 2 气动声源号筒声辐射控制方程

号筒是一种截面不断变化的管，也称声压器。随着号筒截面由小到大的变化，其内部辐射的声波强度将被有效提高。建立一个一维坐标系，如图 1 所示，以号筒喉部为原点，喉部处  $x=0$ ，喇叭口处  $x=L$ ，号筒中不同截面处的半径  $r$  与截面积  $S$  均为  $x$  的函数，号筒截面为圆形。

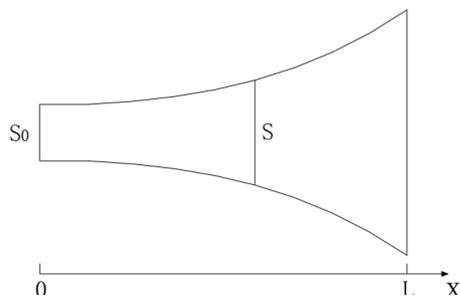


图 1 指数型号筒结构见图

在号筒端部给定一正弦式声源， $p=p_0\sin(2\pi ft)$ 。其中， $f$  为声源频率； $p_0$  为声源驱动初始声压。则得到号筒方程如下：

$$\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + k^2 p = 0 \quad (1)$$

解上述方程，在给定条件下可得指数型号筒截面面积随变量  $x$  的变化关系：

$$S = S_0 e^{\delta x} \quad (2)$$

其中， $\delta$  为蜿蜒指数，它描述的是指数喇叭截面面积变化规律的一项参数。蜿蜒指数越大，喇叭截面辐射面积变化速率越大，喇叭边界的弯曲程度更加明显； $S_0$  为号筒喉部

面积。

## 3 不同喇叭喉半径效果比较

给定喇叭长度为 1m，蜿蜒指数为 4，工作频率为 200Hz，分别取喇叭喉直径为 0.12m 和 0.18m，选择气体比热比为 1.3 的理想空气，在网格上应用三角形与自由四面体的网格进行划分，物理场接口在给定频率的频域中求解亥姆霍兹方程，或作为特征频率或模态分析算例求解。利用 COMSOL 进行声场仿真模拟，对不同的喇叭喉直径所产生的辐射声场进行比较分析。图 2 和图 3 为喇叭喉直径取 0.12m 与 0.18m 时表面总声压。

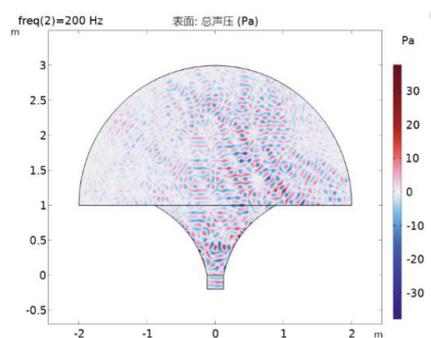


图 2 喇叭喉直径为 0.12 m 时总声压

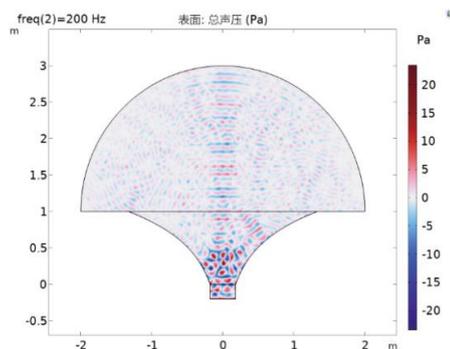


图 3 喇叭喉直径为 0.18m 时总声压

如图 2 和图 3 所示，给定号筒端部 10Pa 的驱动压力，在 100Hz 和 200Hz 的工作频率下，对号筒外场边界弧长对应的声压级进行分析后发现，喇叭喉部直径为 0.12m 时所产生的最大声压级为 104.9dB，喇叭喉部直径为 0.18m 时所产生的最大声压级为 108.7dB。

图 4 与图 5 为喇叭喉直径取 0.1m 和 0.18m 时弧长对应的声压级图。当喇叭喉直径为 0.1m 时，弧长对应的声压级的波动对比其他五组要更为剧烈，因为喇叭的长度和蜿蜒指数是固定的，喇叭喉的直径越小则对应的喇叭口也会相应减小，导致外场边界层附近声压波动更为集中。同时喇叭喉直径取 0.16m 和 0.18m 时其声压级的变化相对于其他几组更加平缓，而对于喇叭喉部直径为 0.18m 时其在 200Hz 下，弧长 3.4m 的位置产生的声压级相比于其他五组更大，因而在 200Hz 的条件下喇叭喉直径取 0.18m 更加适合。

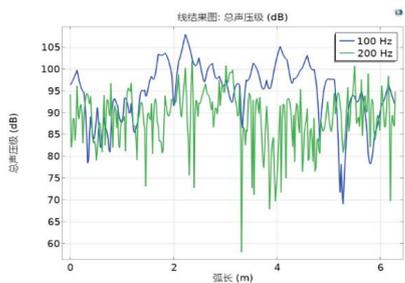


图 4 喇叭喉部直径为 0.1 m 时总声压级

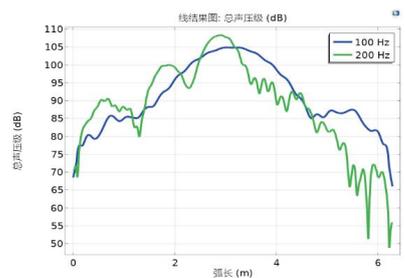


图 5 喇叭喉部直径为 0.18 m 时总声压级

#### 4 不同蜿蜒指数效果比较

根据前文对不同喇叭喉直径的数据分析，得到了一个相对适宜的喇叭喉直径数值，接下来对喇叭的蜿蜒指数进行研究。选定喇叭喉部直径为 0.18m，喇叭长度设置为 1m，设置两个不同的工作频率：100Hz 和 200Hz，分别取号筒的蜿蜒指数：3 和 4.5，通过模拟仿真所得结果进一步细化蜿蜒指数取值范围，以此取到最佳蜿蜒指数对应的最大声压级。图 6、图 7 为喇叭蜿蜒指数取 3 与 4.5 时的声压效果图。

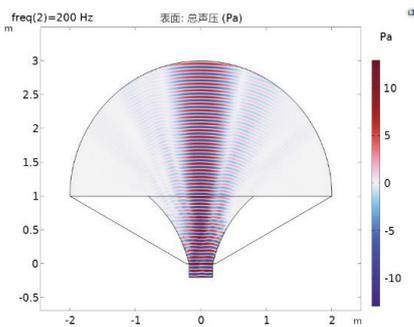


图 6 蜿蜒指数 =3 的喇叭总声压

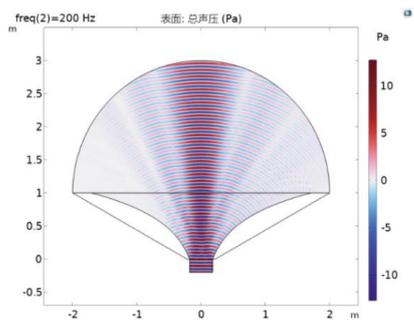


图 7 蜿蜒指数 =4.5 的喇叭总声压

由上图可知，由于蜿蜒指数的增加，导致整个外场计算域内的声压分布出现差异。随着蜿蜒指数的增大整个外场计算域范围内的声压均得到了提升，且从图中看出，蜿蜒指数为 4.5 时整个外场计算域内的声压分布中有四条比较明显的白线，随着蜿蜒指数的减小，这四条白线不仅向计算域两边扩展，而且每两条白线之间的距离也是越来越宽，这是因为蜿蜒指数逐渐变小使得整个计算域内越偏离喇叭口中心位置声压衰减得越快。为找到可产生最大声压级的蜿蜒指数，将半圆弧上的完美匹配边界层上的数据提取下来，以图像的形式进行比较，如图 8、图 9 所示为蜿蜒指数取 3 与 4.5 时边界层的声压级分布图。

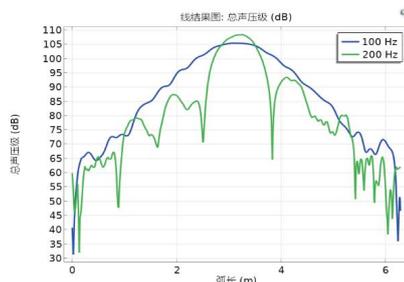


图 8 蜿蜒指数 =3 的喇叭总声压级



图 9 蜿蜒指数 =4.5 的喇叭总声压级

通过仿真模拟可得：蜿蜒指数为 3 时所产生的最大声压级为 107.1dB，蜿蜒指数为 3.5 时所产生的最大声压级为 107.9dB，蜿蜒指数为 4 时所产生的最大声压级为 108.9dB，蜿蜒指数为 4.5 时所产生的最大声压级 108.4dB。当蜿蜒指数为 3 和 3.5 时声压级的分布较为不均匀，圆弧中间的声压级很大但是两侧的声压级很小，而蜿蜒指数为 4 和 4.5 时它们的声压级的分布比较均匀，且蜿蜒指数取 4 与 4.5 时对应的最大声压级要高于蜿蜒指数取 3 与 3.5，所以将蜿蜒指数为 4 和 4.5 之间再进行细分，分别取蜿蜒指数为 4.1、4.2、4.3、4.4 的喇叭再次进行比较分析。重复上述研究发现，蜿蜒指数为 4.1 所产生的最大声压级为 108.6dB，蜿蜒指数为 4.2 时最大声压级为 108.5dB，喇叭蜿蜒指数为 4.3 时所产生的最大声压级为 108.5dB，蜿蜒指数为 4.4 时所产生的最大声压级为 108.6dB。由此可知，蜿蜒指数从 4.1 到 4.4 它们所产生的最大声压级差异并不大，而且所产生的最大声压级并没有大于蜿蜒指数为 4 的喇叭，所以选择蜿蜒指数为 4 作为最优喇叭的参数。

## 5 不同喇叭长度效果比较

选定喇叭的喉直径和蜿蜒指数之后,开始确定喇叭的长度。数据选择与前文一样,设置喇叭的工作频率为200Hz,而后开始对计算域内的声压进行分析。令喇叭喉直径为0.18m,蜿蜒指数为4,取0.5m与1.5m模拟结果的声压分布图,如图10、图11所示。

对比喇叭长度为1.5m时和喇叭长度为0.5m时的声压分布图,可以看出,其声压分布图差异并不大,但较短的喇叭其内部声压更为集中,这也与号筒内部流体流动有关,说明降低喇叭口宽度能够提高内流场压力扰动,原因可能来自宽度降低后喇叭内流动分离程度有所减轻,降低了流动损失,提高了声源的换能效率。上文也提到,以号筒中心为基准,无论是号筒内部还是外场计算域内,越往两侧,声压衰减的速度就越快,这是由号筒本身的结构所决定,其声指向性集中在0度至30度左右,对于气动声源来说,越高的气室压力所带来的声指向性越明显。另外,对于外场计算域内,由声压图可以明显看出,较短的喇叭对应的声场其声压的衰

减程度较小,声指向性相比于较长的喇叭均匀一些。为了找到最大声压级对应的喇叭长度,将圆弧型完美匹配边界层上的数据提取下来,做成图表并进行比较。图12、图13给出了喇叭长度为0.5m与0.9m弧长对应的声压级图。

给定号筒端部10Pa的压力,采用了100Hz和200Hz为工作频率,研究不同喇叭长度所产生的最大声压级,通过建模计算可得:喇叭长度为1.5m时产生的最大声压级为105.7dB,喇叭长度为1.3m时产生的最大声压级为105.1dB,喇叭长度为1.1m时产生的最大声压级为105.9dB,喇叭长度为0.9m时产生的最大声压级为106.1dB,喇叭长度为0.7m时产生的最大声压级为105.1dB,喇叭长度为0.5m时产生的最大声压级为106.4dB。当喇叭长度为0.9m与喇叭长度为0.5m其声压级都在106dB以上,所以将选择范围确定在这两个喇叭长度中。喇叭长度为0.9m时,其圆弧上声压级的变化趋势相对于0.5m时平缓,特别是0.5m长的号筒在位于圆弧两侧声压级多次出现波动,声波出现较大畸变。因此,200Hz的条件下喇叭长度为0.9m更加适合。

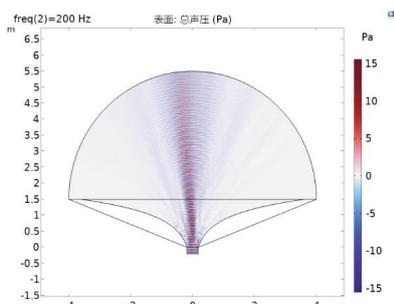


图10 喇叭长度为1.5m时总声压

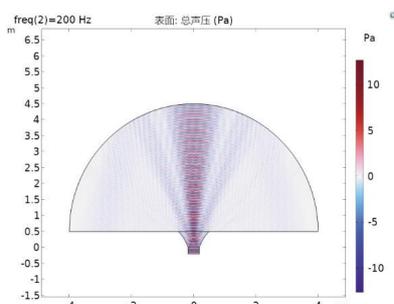


图11 喇叭长度为0.5m时总声压

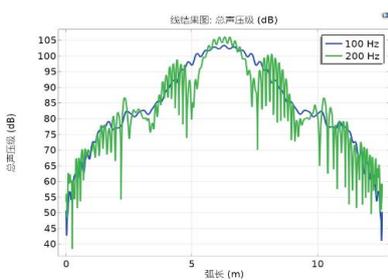


图12 喇叭长度为0.9m时总声压级

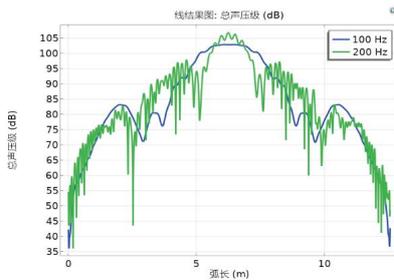


图13 喇叭长度为0.5m时总声压级

## 6 结语

论文通过有限元软件,以数值模拟的方法研究了气动声源喇叭喉部直径、蜿蜒指数、喇叭的长度对辐射声场的影响,并以此进行结构优化,从而找出产生最大声压级的结构参数。主要结果总结如下:

①在驱动频率200Hz和声压为10Pa时,喇叭喉部直径取0.18m时,辐射声压级可达108.7dB。

②增大喇叭的蜿蜒指数可使整个计算域内的声压得到提升;减小喇叭的蜿蜒指数,整个计算域内越偏离喇叭口中

心位置的声压衰减得越快。蜿蜒指数取4时能产生的最大声压级为108.9dB。

③较短的喇叭内部声压更为集中,声源的换能效率得到提升。喇叭长度取0.9m时所产生的最大声压级为106.1dB。

## 参考文献

- [1] 马大猷.现代声学理论基础[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 沈山豪.大功率气流扬声器综述[J].电声技术,1992(12):16-20.
- [3] 王鹏,姜根山,敦世钊.旋笛式气动声源的调制与声传输特性研究[C].中国声学学会.2019年全国声学大会论文集.2019:2.