

旋转点声源声场的数值仿真计算

马晓晶¹, 刘克¹, 冯涛²

(1. 中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室, 北京 100190; 2. 北京工商大学机械工程学院, 北京 100048)

摘要: 旋转声源辐射声场的计算是利用点源模型预测风扇离散噪声的关键所在, 对叶片式机械气动噪声的研究具有重要参考价值。提供了在任意边界条件下计算旋转点声源辐射声场的数值仿真计算方法。将连续的旋转声源离散化, 处理为分布于旋转轨迹上的有限个固定点声源。利用离散化处理后的声源, 通过边界元法分别计算旋转单极子和旋转点力源的辐射声场。在自由空间内的计算结果与理论解进行了对比验证, 得到较为理想的结果; 另外进行了有限长圆管内旋转点声源辐射声场的数值计算, 由此对不同长度圆管的结果进行对比, 分析了管道长度对声场分布以及指向性的影响规律。

关键词: 旋转点声源; 辐射声场; 有限长圆管; 边界元法

中图分类号: O42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-04-0445-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.001

Numerical simulation of rotating point source

MA Xiao-jing¹, LIU Ke¹, FENG Tao²

(1. Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The calculation of rotating sound source is the key to forecasting fan rotational noise by using point-source model, it has an important reference value for the study of the aerodynamic noise generating from blade fluid machinery. A numerical simulation method which can calculate the sound field of rotating point source at arbitrary boundary conditions is provided: Transform continuous rotating point source into finite discrete sources distributing along the rotating trace, and then calculate the sound field of rotating spherical source and rotating point force respectively by using the boundary element method. Comparing the theoretical solution with numerical solution in free space, we can get comparatively perfect result. The sound field of rotating point force in a finite-length round duct is calculated. And the comparison between the results of different duct lengths and the analysis of the influence of duct length change on sound field distribution and directivity are made.

Key words: rotating point source; radiation sound field; finite-length round duct; boundary element method

1 引言

叶片式机械包括汽轮机、燃气轮机、离心泵、轴流泵等, 其气动噪声对国防、工业生产和日常生活都有较大的影响。叶片式机械气动噪声的组成主要分为离散噪声(旋转噪声)和宽频噪声两大类。当叶片在流动状况较好时, 中低频段的噪声以旋转噪声为主。

对于旋转噪声的研究方法大体可以分为理论计算、半经验模型和数值计算几类, 其中点源模型是数值计算方法中非常重要的一种。将叶片表面在流场计算时划分为一系列的网格单元, 每一个网格

单元上受到的非定常脉动力可以看成是一个点力源, 计算每个网格单元的旋转噪声, 对所有微元体积分得出叶片运动的声场^[1]。

因此, 旋转声源的声场对研究叶片式机械气动噪声具有重要意义。1962年, Lighthill 对做匀速直线运动的点声源产生的声场进行了研究, 得到声场在远场的结果, 但没有考虑加速度对声场的影响。1965年, Lawson 对任意运动点声源产生的声场进行了详细研究, 得到了任意运动点声源声场在远场的解^[2]。

数值计算方面, Wan-Ho Jeon、Duck-Joo Lee、Han-Lim Choi 等人利用 Lawson 的任意运动点源方程进行了一系列研究, 结合边界元方法计算了离心泵蜗舌旋转噪声^[3], 以及圆形管道内旋转偶极子的辐射声场^[4]。文献[2]在利用三维非定常流场数值计算得出叶片表面网格单元非定常脉动力的基础上, 分别用 Lighthill 方程和 Lawson 方程计算了离心叶

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-03-15

作者简介: 马晓晶(1984-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为管道声学仿真。

通讯作者: 马晓晶, E-mail: maxiaojing@mail.ioa.ac.cn

轮的旋转噪声。但是无论 Lighthill 方程还是 Lowson 运动方程，针对的都是自由声场，在非自由边界条件下对两者的引用都是一种近似。

理论计算方面，西安交通大学的吴九汇在理论上推导了旋转点声源自由空间声场的频域精确解^[5]，刘秋洪、黄墨宇等人给出了旋转点源在无限长圆管以及封闭的圆形管道中的声场的理论解^[6,7]，但他们的理论结果很难推广到不同边界条件的情况。

本文将单个旋转声源沿运动轨迹离散化，处理为旋转圆周上分布的一系列固定声源，再使用边界元方法，可以方便地计算出各种边界条件下旋转声源的声场。

2 旋转声源离散处理

叶片每个单元上的脉动力类比为偶极子源。

在仿真时，沿声源旋转轨迹分布一系列相同的声源，每个声源在时域乘以图 1 所示的矩形函数。

其中， $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 为一个旋转周期， $\tau = \frac{2\pi}{M \cdot \omega_0}$ 代表

两个相邻分布离散声源之间的时间差。 M 为分布的声源个数， ω_0 为旋转速度， m 表示由起始点算起的第 m 个分布声源， n 表示傅立叶变换阶数。

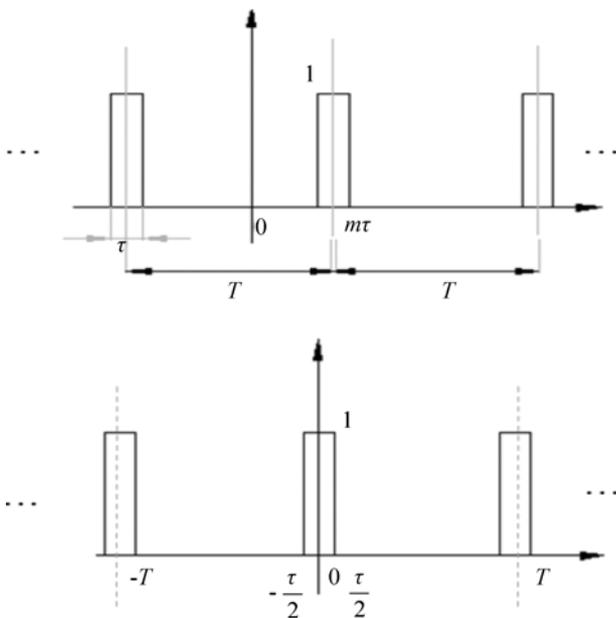


图 1 声源离散化处理时间窗

Fig.1 The time window for sound source discretization

所得结果进行傅立叶分解后作为新声源，编程生成 Sysnoise 命令流读入。傅立叶变换后，时域的延时在频域表现为相位差：

$$\text{phase} = -n \cdot \omega_0 \cdot m \cdot \tau = -n \cdot \omega_0 \frac{m \cdot 2\pi}{M \cdot \omega_0} = -\frac{m \cdot n \cdot 2\pi}{M}$$

，各个

离散声源之间存在固定的相位差，具有相关性，Sysnoise 仿真计算中包含了相关性的考虑。

这样，将连续旋转的单个声源用一系列离散分布的声源代替，可以直接在 Sysnoise 声学仿真软件中进行计算。

3 简单旋转声源声场计算验证

在用上述方法进行风扇旋转噪声的计算之前，有必要先计算简单声源旋转产生的声场，以验证方法的正确性。

下面针对单个点声源和点力源的旋转，做了一系列的仿真计算，并与一些文献的结果作对比。

3.1 自由空间旋转点声源

首先计算的是自由空间中的旋转点声源，即文献[5]中描述的情况，在图 2 的球坐标系中，初始位置为 r_b ，观察点为 r_0 。

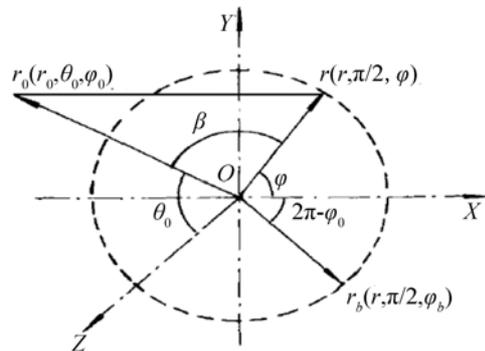


图 2 自由空间中点源旋转运动示意图^[4]

Fig.2 Schematic plan of rotating point source in free space^[1]

对于远场，取

$$r_0 = 2.0\text{m}, r = 0.3\text{m}, \phi_b = 0, \phi_0 = -\frac{\pi}{4}, Q = 1.$$

按文献[5]所述，取不同旋转速度分别进行计算，结果如图 3 所示。

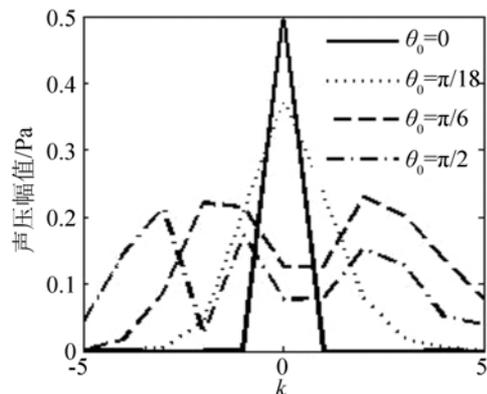


图 3 远场声压幅值的计算结果

Fig.3 The results of far-field acoustic amplitude calculation

仿真结果和文献[5]中的结果符合的很好。从计算结果中可以看出观察角度对谐波分布的影响。

对于近场, 取 $r_0=0.4\text{m}$, 其他参数与远场相同。也可以得到很好的结果, 如图 4 所示。

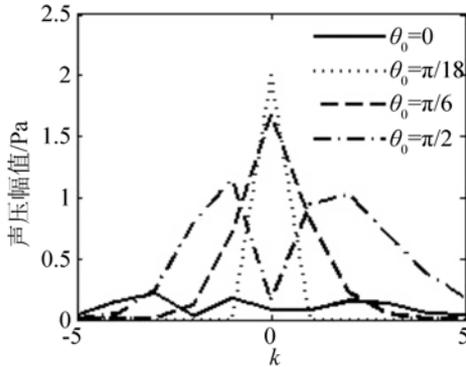


图 4 近场声压幅值的计算结果
Fig.4 The results of near-field acoustic amplitude calculation

在自由空间中, 点声源旋转无论是远场还是近场, 都能够通过仿真得到比较精确的结果。

一般来讲, 离散声源个数越多, 声源的离散化分布越接近实际情况, 计算结果也越精确。

不过对自由空间点声源的计算结果表明, 在离散声源增加到一定数量 M_0 之后, 再增大 M , 计算结果不会有明显的变化。 M_0 的大小与旋转速度 ω_0 和旋转半径都有关系。旋转速度越快, 旋转半径越大, M_0 也就越大。

如上文的自由空间单极子旋转声场计算, 不改变文中参数, 只要分布 16 个离散声源, 就可以得到比较好的结果。如果把旋转速度增加一倍, 需要大约 20 个分布声源。如果把旋转半径增大一倍, 则需要 32 个分布声源。

在非自由场的情况下, 旋转速度也会影响边界元法的计算精度。旋转速度越快, 需要计算的离散噪声的频率越高, 在边界元网格大小不变的情况下, 精确度会降低。

测点位置也会对计算精度有影响, 一般来说远场结果要好于近场, 不过在上文自由空间的计算结果中, 这种差异并不明显。

3.2 自由空间旋转点力源

文献[4]中进行了自由空间中点力源的仿真, 并与理论计算结果进行了对比。利用文献[4]中的条件进行仿真计算。

使用 Sysnoise 仿真, 点力源大小 F , 由于旋转产生声场。声源类比为分布于旋转圆周上的一系列偶极子, 每对偶极子乘以一个矩形脉冲。结果在频域分解后, 表现为仅在转动频率整数倍出现的离散噪声。

在 Sysnoise 中处理为两个距离很近的反相点声源, 幅值 $A=\frac{F}{4\pi d}$, 仿真结果和文献[4]中的结果对应得很好。

垂直于旋转平面的圆周上声压计算结果如图 5 所示。指向性结果如图 6 所示。

可以看出, 旋转点力源的谐波分布也与观察角 θ 的大小密切相关, 当 θ 较大时, 也就是靠近轴向时, 高次谐波衰减很快, 而 θ 较小时谐波相对丰富。

从指向性图来看, 声场主要分布在 θ 为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 这一范围内。这都与理论和实际结果相吻合。

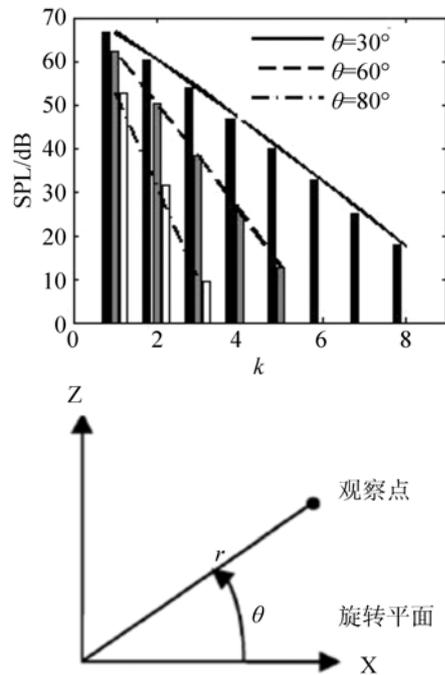


图 5 自由空间中旋转点力源(偶极子)声压级谱线, 观察点半径 $r=D_s$
Fig5 Acoustic pressures spectrums of a rotating dipole source in a free field at $r=D_s$

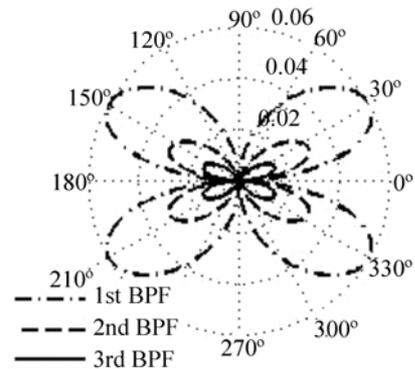


图 6 由空间中旋转点力源(偶极子)声场指向性图(无量纲化)
Fig.6 Nondimensionalized acoustic directivity patterns from a rotating dipole source in a free field.

4 圆管中旋转点力源特性分析

以上结果验证了对旋转声源进行离散处理时,

仿真方法的正确性。用上述方法结合边界元理论，可以计算非自由边界条件下旋转声源声场分布。

在两端开口的无限薄圆形管道内有一旋转点力源，点力源大小方向均与上文自由空间中的情况相同，旋转平面垂直于管道轴线，如图 7 所示。

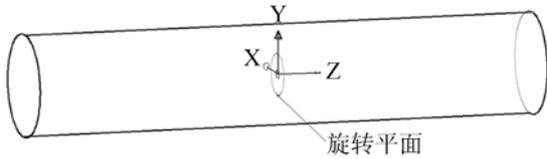


图 7 圆管内点力源旋转示意图
Fig.7 Schematic plan of rotating point source in round duct.

4.1 不同长度圆管内的声场分布

图 8、9 分别为短圆管和长圆管中旋转点力源的声场分布。从图 8 和图 9 中可以看出，当管道长度 $L=5D$ 和管道长度 $L=15D$ 时，一阶频率处的声场分布明显不同。旋转声源离散噪声的一阶频率 90.1Hz，低于管道截止频率 99Hz，但由于和管道截止频率较接近，因此高次波衰减较慢，管道较短时仍有高次波传播。而离散噪声二阶和三阶频率均高于管道截止频率，整个管道中始终有高次波传播。

这从图 10、11 的指向性图中也可以清楚地看到。离散噪声一阶频率处，管道较短时仍然呈现丰富的高次波，使得指向性图比较复杂，且随着管道长度变化各不相同。当管道长度超过一个上限(本例中约为 $8L$)时，高次波衰减明显，从声场分布云纹图和指向性图都可以看出，管道出口处的声波近似于平面波，并且随着管道长度的增加与平面波更加

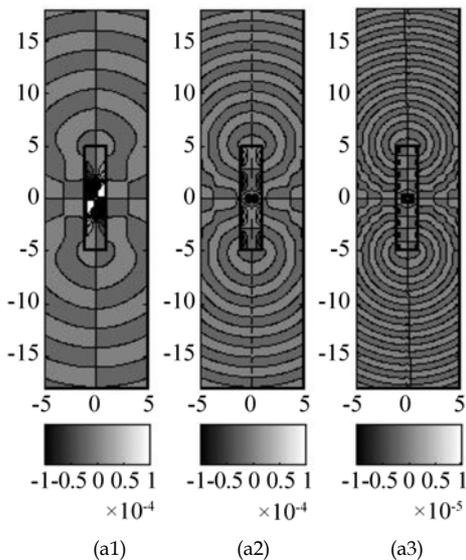


图 8 短圆管($L=5D$)中旋转点力源的声场分布 (a1): 1 倍叶片通过频率 (BPF), (a2): 2 倍 BPF, (a3): 3 倍 BPF(无量纲)
Fig.8 Sound field distribution of a rotating point force in a short round duct ($L=5D$)(a1): the 1stBPF, (a2): the 2nd BPF, (a3): the 3rd BPF,(Nondimensionalized)

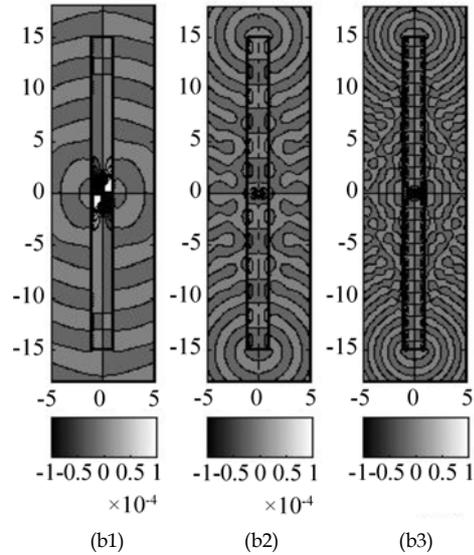
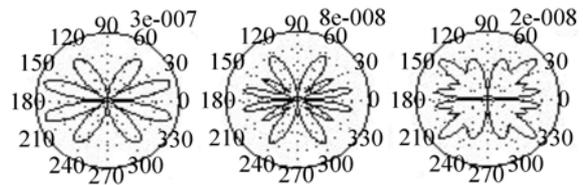
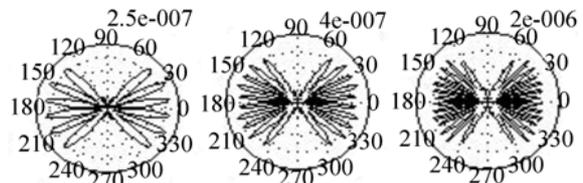


图 9 长圆管($L=15D$)中旋转点力源的声场分布 ((b1): 1 倍 BPF, (b2): 2 倍 BPF (b3): 3 倍 BPF(无量纲)
Fig.9 Sound field distribution of a rotating point force in a long round duct ($L=15D$) ((b1): the 1st BPF, (b2): the 2nd BPF (b3): the 3rd BPF(Nondimensionalized)



管长分别为 $L=3D$, $L=5D$, $L=7D$ 时, 1 阶 BPF 指向性图



管长分别为 $L=3D$, $L=5D$, $L=7D$ 时, 2 阶 BPF 指向性图

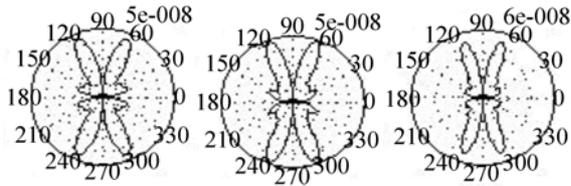
图 10 短圆管中旋转点力源声场指向性图 (无量纲)
Fig.10 Nondimensionalized acoustic directivity patterns of a rotating point force in a short round duct

接近。

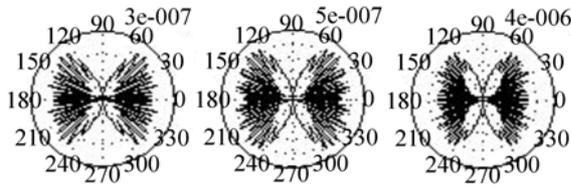
离散噪声的二、三阶频率已经高于管道截止频率，高次波也可以沿轴线转播，辐射声场指向性图更为复杂，旁瓣更丰富。而相对于一阶频率，由于高次波衰减情况的不同，因此指向性图在管道长度增加时的变化规律和一阶频率有区别。声场指向性始终在逐步变化，旁瓣不断增加，但整体形状相似。

5 结 论

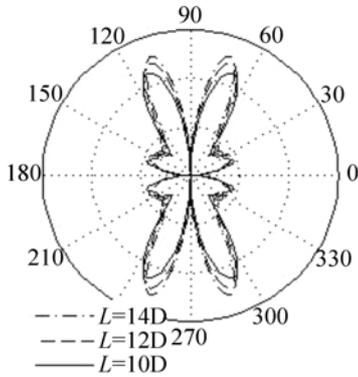
将连续的旋转声源离散化处理为分布于旋转轨迹上的有限个固定点声源，再利用边界元方法，可以方便地计算旋转点源在各种边界条件下的辐射声场。



管长分别为 $L=10D$, $L=12D$, $L=14D$ 时, 1 阶 BPF 指向性图



管长分别为 $L=10D$, $L=12D$, $L=14D$ 时, 2 阶 BPF 指向性图



管长为 $L=10D$, $L=12D$, $L=14D$ 时, 一阶 BPF 指向性对比

图 11 长圆管中旋转点力源声场指向性图(无量纲)

Fig.11 Nondimensionalized acoustic directivity patterns of a rotating point force in a long round duct

由自由空间的情况推广到有限长圆管, 管道长度对于声场分布具有显著的影响, 其中对于低于管道截止频率的离散噪声低阶频率, 变化规律在管长为某一数值时具有跳跃式的变化, 由混杂了高次波的声场变为较单纯的近似于平面波的模式。该模式

在管道轴线处向下凹陷, 大小趋近于零, 这是由旋转点源的特性决定的。

参 考 文 献

- [1] 黄翌宇, 刘秋洪, 祁大同. 离心风机气动噪声研究方法的分析与建议[J]. 风机技术, 2005, (1): 3-6.
HUANG Zhaoyu, LIU QiuHong, QI Datong. Analysis and suggestion on research methods of aerodynamic noise for centrifugal fan[J]. Compressor, Blower and Fan Technology, 2005, (1): 3-6.
- [2] 刘秋洪, 祁大同, 毛义军. 离心叶轮气动声场的数值计算与分析[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 110-114.
LIU QiuHong, QI Datong, MAO Yijun. The analysis and numerical calculation of aerodynamic sound field for centrifugal impeller[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(1): 110-114.
- [3] Wan-Ho Jeona,*, Duck-Joo Lee. A numerical study on the flow and sound fields of centrifugal impeller located near a wedge[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266: 785-804.
- [4] Han-Lim Choi, Duck Joo Lee. Development of the numerical method for calculating sound radiation from a rotating dipole source in an opened thin duct[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295: 739-752.
- [5] 吴九汇, 陈花玲, 黄协清. 旋转点声源空间声场的频域精确解[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(1): 71-75.
Wu Jiuhui, Chen Hualing, HuangXieqing. Acoustic solution of rotating point source in frequency domain[J]. Journal of Xi' An Jiaotong University, 2000, 34(1): 71-75.
- [6] 刘秋洪, 黄翌宇, 祁大同, 等. 圆管内旋转点声源声学频域分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(5): 541-544.
LIU QiuHong, HUANG Zhaoyu, QI Datong, et al. Frequency domain solution of a rotating point source in an infinite duct[J]. Journal of Xi'an Jiaoyong University, 2004, 38(5): 541-544.
- [7] 黄翌宇, 刘秋洪, 祁大同, 等. 封闭圆柱腔内旋转点声源声压的近场频域解[J]. 应用力学学报, 2004, 21(2): 37-40.
HUANG Zhaoyu, LIU QiuHong, QI Datong, et al. Near field frequency domain solution of rotating point source in closed cylindrical cavity[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(2): 37-40.