

文章编号：0258-0926(2018)03-0151-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0151

# 反应堆结构的泵致振动噪声研究

冯志鹏, 吴万军, 熊夫睿, 张文正, 吕 稀, 宋海洋, 王碧浩

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

**摘要：**先进的振动噪声预报与减振降噪分析技术对于降低结构的振动噪声水平具有重要意义。为了进行准确的噪声预报，需要采用合适的方法并建立噪声预报模型进行计算分析。针对反应堆及一回路系统，首先研究了振动噪声预报分析方法的变量参数及其影响规律，研究比较了声学分析方法包括直接边界元法、声学有限元自适应层方法、自适应阶次有限元声学法、声学有限元自适应层方法联合自适应阶次有限元声学法；其次，联合有限元法和声学边界元法，研究了耐压壳模型对振动噪声的影响，得到了加强筋、双层壳对系统振动特性及辐射噪声的影响规律。基于研究结果，建立了声振计算模型，开展了减振效果评价、声辐射分析及减振措施研究，得到了典型传递路径的振级落差、通过耐压壳辐射的声压级和外声场以及不同减振措施的减振降噪效果。

**关键词：**声学；有限元法（FEM）；边界元法（BEM）；减振降噪

**中图分类号：**O322 **文献标志码：**A

## Study on Pump Induced Vibration Acoustics of Reactors

Feng Zhipeng, Wu Wanjun, Xiong Furui, Zhang Wenzheng,  
Lyu Xi, Song Haiyang, Wang Bihao

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Advanced analysis methods for prediction and reduction of vibration and noise are of great significance for reducing vibration noise level of the structure. In order to make accurate noise prediction, it is necessary to adopt the appropriate method and establish the model of noise prediction. Firstly, the variable parameters and their influence law of vibration noise prediction and analysis method, for reactor and the primary loop system, are studied. Comparative studies are made on the acoustic analysis methods including direct boundary element method, acoustic finite element automatic matching layer method, acoustic finite element method adaptive order, and acoustic finite element automatic matching layer method combined acoustic finite element method adaptive order. Secondly, the effect of pressure hull on the vibration noise is studied by the finite element method and the acoustic boundary element method. Meanwhile, the effect of reinforcing rib and double shell on the system vibration characteristics and radiated noise is obtained. Based on these studies, a vibration-acoustic model is established. Then, the research of vibration reduction evaluation, acoustic radiation analysis, vibration and noise reduction are carried out. The vibration level difference of typical transfer path, the sound pressure level and the external acoustic field radiated by the pressure hull, and the effect of vibration and noise reduction with different vibration reduction measures are obtained.

**Key words:** Acoustics, FEM, BEM, Vibration and noise reduction

## 0 引 言

振动噪声是工业中的重要噪声源，它不仅降

低安静性和舒适性、对周围环境引起污染，而且会降低设备的使用寿命，所以预测和控制振动噪

收稿日期：2017-04-24；修回日期：2017-08-20

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51606180）

作者简介：冯志鹏（1986—），男，高级工程师，现从事振动噪声、流致振动研究工作

声具有显著的理论意义和工程价值。

早期对振动噪声的研究大都局限于对解析方法的探讨,如 Fahy<sup>[1]</sup>、Pavic<sup>[2]</sup>等对简单直管的声辐射特性进行了研究,但解析方法对模型和边界条件等模拟较为困难,因此数值研究就变得尤为必要。数值分析方法主要有:边界元法、有限元法、有限元/边界元相结合法、统计能量法等,其中,有限元法可以计算任意结构的振动和声场,边界元法在辐射声场计算中具有使分析问题降维等优点,是计算声学中常用的方法。

另一方面,早期人们主要关注结构的功能和力学性能如振动、应力等,较少关注声学性能。随着各领域研究的不断深入,对声学性能的需求日益增加,各类能源和工程机械等诸多领域都提出了大量的声学声学相关问题。在反应堆结构中,针对二回路系统进行了大量的减振降噪研制和改装,随着二回路系统及其他机械噪声逐渐被有效控制,一回路系统的振动噪声问题凸显。

## 1 控制方程

利用有限元方法离散结构体,对于承受外载的系统,其动力学方程如下:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

式中,  $M$  为质量阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $u$ 、 $\dot{u}$  和  $\ddot{u}$  分别为位移、速度、加速度矢量;  $F$  为作用在系统上的外载荷。

声学方程从流体的连续性方程、运动方程、能量方程、物态方程推导而来。对于封闭的声场,声学基本方程用 Helmholtz 方程描述:

$$\nabla^2 p(x, y, z) - k^2 p(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

式中,  $(x, y, z)$  为空间中任意点;  $p(x, y, z)$  为场点处的声压;  $k$  为声波波数,  $k = 2\pi f / c$ ;  $f$  为频率;  $c$  为声速。

考虑声域边界条件和 Sommerfeld 辐射条件,声场积分方程为:

$$\int_s \left[ p(Y) \frac{\partial G(X, Y)}{\partial n} + ip\omega V_n(Y) G(X, Y) \right] ds = c(X)p(X) \quad (3)$$

$$G(X, Y) = \frac{e^{-ikR}}{4\pi R}$$

$$R = \|X - Y\|$$

式中,  $V_n$  为边界节点的法向速度;  $n$  为结构外表面法向单位矢量;  $i$  为虚数单位;  $s$  为声源表面;  $\omega$  为圆频率;  $X$  和  $Y$  分别为空间中任意场点和边界积分点。当  $X$  处于外声场时,  $c(X)=1$ ; 当  $X$  处于耦合面上时,  $c(X)=0.5$ ; 当  $X$  处于结构内部时,  $c(X)=0$ 。

采用谐响应法求解方程(1)获得系统的动力学响应;采用声学边界元法或声学有限元法求解方程(3)进而获得声场响应。

## 2 声学分析方法研究

声学计算方法主要有声学边界元法(BEM)、声学有限元法(FEM)、声线法以及统计能量法。为确定适用于反应堆结构振动噪声预报的分析方法,研究以下方法的变量参数及其影响规律:直接边界元法、声学有限元的自适应层(AML)方法、自适应阶次有限元声学(FEMAO)方法、AML联合FEMAO方法。

无论是声学边界元法还是声学有限元法,在声学计算之前应根据所使用的方法建立相应的边界和声场模型。声学边界元法通常只需要将声学空间离散为声学边界网格,声学有限元法则需要将声学空间离散为体网格,声场网格的单元尺寸与计算频率密切相关。

图1为声辐射分析模型的边界。为分析系统向外辐射出的噪声情况,建立一个圆柱形的声场,声场与耐压壳的距离为1m,同时在声场周围选取15个观察点,代表系统向外的辐射噪声,声场分析模型及场点(突出显示的点)如图2所示。

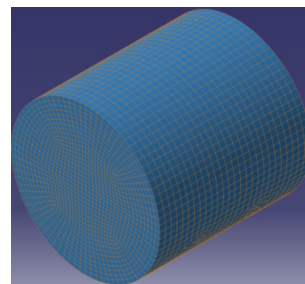


图1 声辐射分析模型边界  
Fig. 1 Acoustic Model Boundary

为表述方便,文中所有数据均进行了归一化:辐射噪声:采用最大的场点噪声归一化;振级落差:采用传递路径中最大的振级落差归一化;频率:采用分析的频率上限值归一化。

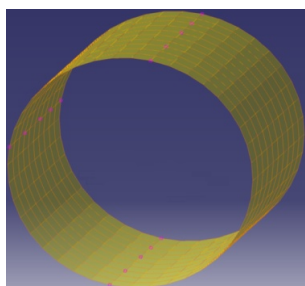


图2 声场分析模型及场点

Fig. 2 Acoustic Field Model and Field Points

### 2.1 直接边界元法

直接边界元法可以计算封闭网格的外部声场。通常在声学分析前，均采用有限元软件建立声场网格，为提高建模效率和分析精度，本文尝试利用凸网格法建立边界元声场网格。

图3给出了采用有限元软件 ANSYS 与凸网格法建立的声学边界元模型进行声学计算所得到的边界面和声场上的声压级。对比分析可知，频率较低时，2种声学网格所预测的声压级基本相同，但随着分析频率的增高，2种声学网格的结果有所差异，原因在于采用有限元软件建立声学

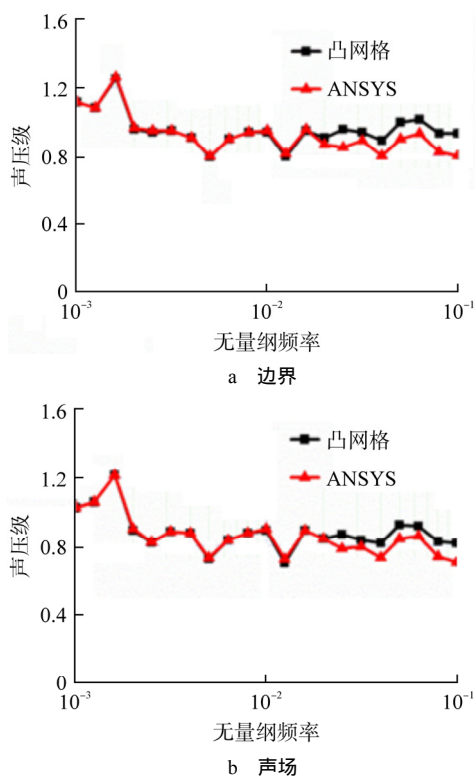


图3 凸网格法声学网格与 ANSYS 声学网格的结果对比

Fig. 3 Comparison between Convex Method Acoustic Grid and ANSYS Acoustic Grid

网格前，较难根据分析对象的频率上限确定网格尺寸，不容易估算声学网格所能分析的频率上限，而采用凸网格法建立声学网格时，则会根据分析频率上限自动生成满足要求的网格，提高了分析效率和精度。

### 2.2 AML 方法

声学有限元法在分析复杂流场、温度场等变化梯度对声传播的影响等方面具有相当优势，同时，声学有限元 AML 法在计算外场噪声时比较容易满足低频和低频计算的要求。因此，引入 AML 方法来进行辐射声场计算，并与声学边界元法的结果进行对比。

在采用 AML 方法进行声学计算时，首先需要建立声学有限元的体网格，然后在体网格表面建立 AML 表面，进行外声场噪声预报。为分析声学有限元体网格的厚度（也称为 AML 层厚度）对声学响应的影响，分别采用凸网格法建立 AML 层厚度为耐压壳模型的 1.05 倍、1.3 倍、1.5 倍及 2 倍模型。

1.3 倍模型采用 AML 方法计算得到的声压级与直接边界元法的结果进行对比分析，两者的差别在 2% 以内。

通过比较 1.05 倍、1.3 倍、1.5 倍、2 倍模型的边界和声场上的声压级可知，不同 AML 层厚度模型结果的最大差别在 2% 内，说明 AML 层厚度基本不影响 AML 方法的预测精度。因此，可用较少的有限元网格进行声学计算以降低计算量和提高计算效率。

### 2.3 AML 联合 FEMAO 方法

对传统声学边界元法来说，当模型的分析频率较高时，则需要更小的网格尺度，随着模型自由度的增大，计算时间与所需内存都会急剧上升，甚至由于计算规模过大而无法计算。另一方面，虽然通过对 AML 方法的研究，采用 AML 法解决了声学有限元体网格的建立问题，但当模型较大和分析频率较高时，所需内存和时间仍然无法接受，急需一种能够采用较少的网格而模拟更高分析频率的方法。为此，本文采用 AML 联合 FEMAO 方法来解决这个问题。

分别采用 AML 联合 FEMAO 方法与 AML 方法计算声场上的声压级，通过对比发现，两者的计算结果相同；在对比 2 种方法所用计算时间时，

均采用单核、无量纲分析频率均为 0.1；在对比 2 种方法频率上限时，两者均采用相同的网格。结果表明，AML 联合 FEMA0 方法大大提高了计算效率和分析频率，可以用较少的网格数来求解较高频率上限的声场计算问题。

### 3 振动分析模型

#### 3.1 结构分析模型

为准确模拟结构的振动特性，并且又能使模型尽量简化，应根据有限元理论和实际的结构特征，采用相应的单元类型和简化原则，建立一回路系统的分析模型。

对反应堆结构中代表主要刚度和质量特征的结构建立三维模型，采用壳单元模拟，包括：主泵接管；反应堆压力容器、内支承结构、外支承结构。

对反应堆结构中的内部构件、控制棒驱动机构及堆顶结构、蒸汽发生器及其内部构件、主泵等采用管单元和集中质量单元模拟。一些部件对整体结构的刚度影响甚小，在模型中只考虑其质量影响，如保温层、堆芯中子测量组件、测温组件等。与反应堆压力容器简体相连接的外部管道对整个反应堆结构的刚度和质量影响很小，故分析模型中忽略与反应堆结构连接的一回路辅助系统、二回路主给水系统以及主蒸汽系统等的影

响。耐压壳用于容纳反应堆及一回路系统，包含加强筋、肋板、外壳等结构，由于结构复杂，在振动噪声分析时需做一定的简化。

#### 3.2 分析输入

在主泵运转情况下，其激励力作用于电机位置，直接获取该激励力十分困难。本文利用主泵机脚的振动测量加速度级，通过动刚度法得到主泵激励力作为分析输入，进行泵致振动及辐射噪声分析。激励力应保证主泵机脚位置的振动加速度级与测量值一致。

将主泵机脚振动加速度级的测量结果与计算结果进行对比，机脚位置的振动加速度级的计算值与测量值吻合，说明通过本文载荷识别得到的主泵激励力是合理的。

### 4 结果分析

将上述方法计算得到的辐射噪声与测试值进行对比，两者吻合较好，说明本文的分析方法是

合理和可行的。

#### 4.1 振动特性分析

分析以下典型的振动传递路径：主泵接管、压力容器简体、内支承结构、外支承结构。

图 4~图 7 分别给出了主泵接管、压力容器简体、内支承结构、外支承结构的振级落差（图中数据基于振级落差的极大值进行了归一化处理）。可以发现，主泵接管在低频段的振级落差最大，发生在 Y 方向，为 0.48，高频段与全频段内的振级落差相当；压力容器简体在高频段内的振级落差最大，为 0.61，发生在 Z 方向，说明压力容器简体在 Z 方向有较好的减振效果；内支承结构的

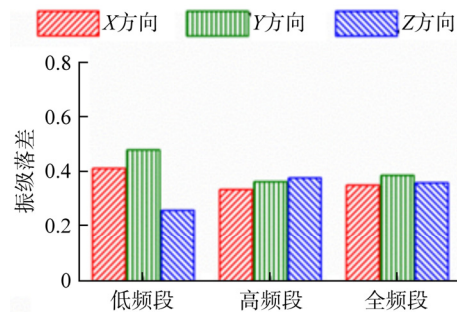


图 4 主泵接管的振级落差

Fig. 4 Vibration Level Difference of Pump Nozzle

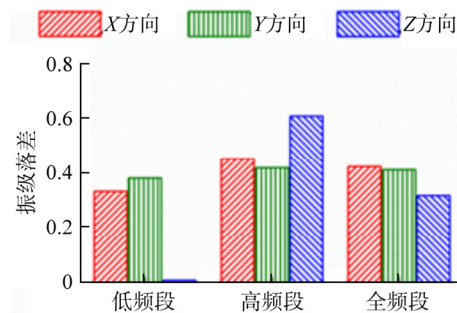


图 5 压力容器简体的振级落差

Fig. 5 Vibration Level Difference of Pressure Vessel Shell

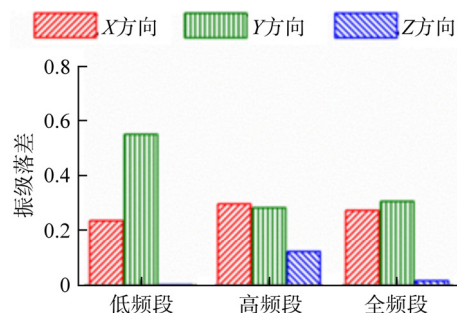


图 6 内支承结构的振级落差

Fig. 6 Vibration Level Difference of Internal Support



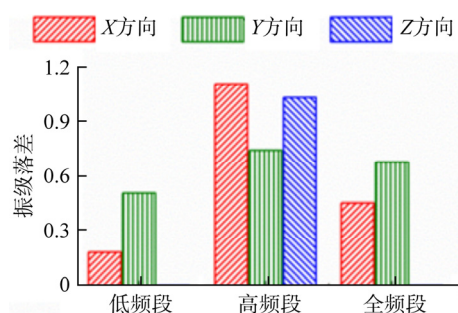


图7 外支承结构的振级落差

Fig. 7 Vibration Level Difference of External Support

振级落差最大值发生在低频段的Y方向,为0.55;外支承结构在高频段的振级落差最大,远大于低频段的,说明外支承结构的减振作用主要在高频段,且外支承结构的振级落差远大于其他几条路径,说明外支承结构的减振作用更明显。

#### 4.2 声辐射分析

通过声学计算,可以得到不同频率下边界(耐压壳表面)、声场上的声压级及通过耐压壳对外辐射出的声功率等。图8给出了系统的场点辐射噪声曲线。从图8中可以看出,15个观察点位置的声压级最大值有所不同,这是因为系统不同位置的振动不同,最大值出现在无量纲频率为 $1.6 \times 10^{-3}$ 处,这是因为耐压壳也是在无量纲频率为 $1.6 \times 10^{-3}$ 处的振动最大。

### 5 结束语

本文联合有限元法、声学边界元法和声学有限元法,形成了反应堆及一回路系统的振动噪声

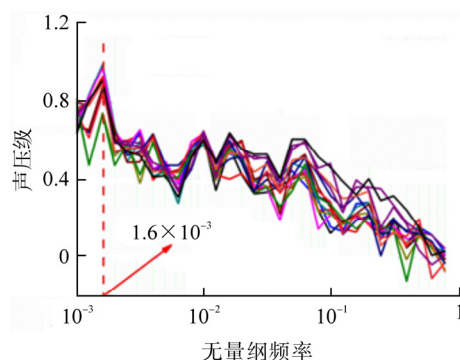


图8 场点的声压级曲线

Fig. 8 Sound Pressure Level of Acoustic Field Points

分析方法和流程,研究了反应堆结构的泵致振动特性及辐射噪声。对反应堆及一回路系统,利用有限元法计算结构振动,采用AML方法联合FEMAO方法计算声学响应,进行振动噪声预报是非常有效的,本文的振动噪声分析技术也可方便地用于反应堆其他结构的力学-声学分析与设计。

#### 参考文献:

- [1] Fuller C R, Fahy F J. Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shell filled with fluid[J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 81(4): 501-518.
- [2] Pavic G. Vibration energy flow in elastic circular cylindrical shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 142(2): 293-310.

(责任编辑:孙凯)