

船舰管道通风系统消声器建模及仿真平台设计

李霖

(东莞职业技术学院 广东 东莞 523808)

摘要: 船舰通风系统中消声器的优化设计有利于消声器与通风系统内风量、风速相匹配,降低其工作噪音。本文以船舰管道通风系统中的直管式阻性消声器为研究对象,采用有限体积法,并结合流体动力学、噪声控制、有限元声学仿真等理论,在考虑实际空间约束条件下对管道消声器结构进行了GEM-3D建模及离散,同时在GT-ISE平台内部搭建了传递损失及背压计算平台,该工作有助于开展消声特性研究、优化管道消声器的声学结构参数。

关键词: 通风系统; 噪声; 消声器; 仿真平台

0 引言

空调管道通风系统分布在舰船的各个部位,是舰船人机工程中的重要噪声源之一,在某些局部范围和特定时段,由空调、通风系统产生的噪声已成为主要矛盾,影响着工作人员的听觉舒适性,干扰正常的工作与睡眠,还会引发工作人员的心理不适感,降低劳动效率。

在通风管路中安装管道消声器是降低通风系统噪声的重要途径,对降低舰船工作噪声、优化舰船舱室内工作环境具有重要意义。本文采用GT-SUITE软件中用于发动机工作过程模拟的一维非常流体力学模块GT-POWER,先后在完成GEM-3D建模、GT-ISE仿真平台搭建工作,为舰船通风系统管道消声器的声学性能、空气流动性能的仿真计算分析奠定基础。

1 GT-POWER 计算流程

图1所示为GT-POWER的计算流程。参考经验公式对消声器的基本参数进行初步设定,并在GEM-3D模块建立三维模型;参考实际条件设置修改环境参数及消声器模型参数,离散后导入GT-ISE中进行仿真计算及数据后处理;并通过模型参数的迭代优化,最终达到设计的要求。

2 消声器网管的建立流程

网管模型的建立流程如图2所示。在壳体及内部件建模阶段,将消声器的外壳、平板、圆管等各个元件简

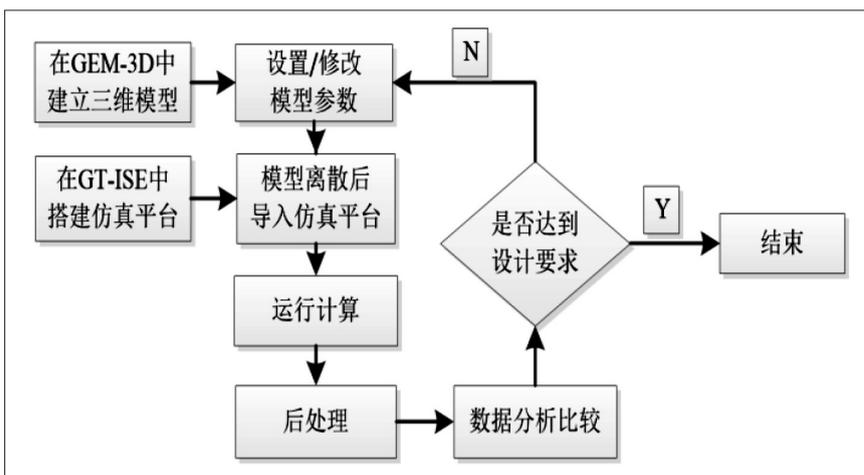


图1 GT-POWER 计算流程示意图



图2 GEM-3D 中消声器的建模流程

化为二维板/壳结构,所有建模都在中性面上进行平面设计,然后在厚度尺寸栏输入相应数值即可。

2.1 消声器 GEM-3D 结构模型建立

在GEM-3D零件库中选择构造隔板、管道、套管、壳体等部件,然后添加板孔、管孔、消声材料等并设置参数。直管打孔时需设置结构参数(孔数、分布样式等)、尺寸参数(孔径、孔位置等)及其他参数(顺/逆流交换系数、摩擦系数、视图颜色等)。通过调整壳体透明度,设计者可看清并选择消声器内部结构。在直管上打孔时,打孔区域设置只能近似而无法完全精确,孔排布只能选择直排而不能选择三角形排列或其他分布方法;此外,孔轴向分布的近似也会对消声器声学性能产生一定影响,因此在穿孔异型分布时可能导致仿真误差

的产生。

2.2 消声器端口连接设置

消声器模型基本完成后,需设置消声器的进出端口。对于双出口或多出口消声器,离散时须指定进/出口以及气流流动方向,否则后期仿真计算无法正确进行。没有进行进/出口连接设置时,仿真能够在无出错提示的情况下进行;不过由于系统默认为声音沿坐标轴正方向传播,因此可能与实际不符而导致出错。

2.3 消声器结构干涉检查

当用户需要创建*.dat模型文件时,干涉检查自动运行。有两种不同的类型的干涉将被删除:第一种是实际干涉,就是两个元素事实上占用同一个位置;第二种是包含一个弯管对象的可能干涉。由于检测弯曲管干涉的复杂性,限制弯曲管的正方形框应用,而不是实际管表面,因此灵敏度设置过高可能导致干涉误报。系统会询问用户是否要继续产生*.dat文件:选择“不”,将用户返回到消声器前处理,潜在的干涉也有必要被检查和更正;如果用户选择“是”,就会产生*.dat文件。值得注意的是,只有消声器没有真实干涉时才能正确产生*.dat文件。

2.4 消声器结构离散

将设计的消声器 GED-3D 模型网管离散化,将其直接转化为*.dat文件,导入 GT-ISE 中生成连通的网管模型。

模型离散长度是指模型进行网格化分后的单元体积长度, X、Y、Z 三个方向任意方向的离散化长度根据几个不同变量进行单独计算,通常其取值为消声器入口端管道直径的 0.6 倍。

在 X 方向,消声器每个腔室单独离散化,即整个消声器 X 方向的离散化长度 ΔX 可以不是常量。在各个腔室内部, ΔX 是常量且是根据消声器腔室的长度和目标离散长度来计算的;在消声器内部, ΔX 可能会受到孔口尺寸的影响。

在 Y 和 Z 方向,离散化长度 ΔY 、 ΔZ 为常量,是基于适当方向最大壳体尺寸和用户输入的目标离散化长度。由于消声器里的某些孔的尺寸过小,因此 ΔY 、 ΔZ 为长度会受到影响。

一旦离散化长度确定,按照计算得到的 ΔX 值将壳体沿 X 方向分成片段;每个片段根据 ΔY 和 ΔZ 被进一步分成矩形截面。运算法则决定每排每列矩形的数目,该矩形将与壳体形状非常接近。

在设定离散长度时应注意单元体积的离散长度决定 GT-ISE 仿真的计算时间以及结果精度。在全部模型的离散网格中,最小单元体积的离散长度决定了整个模型计算时间;同样,最大单元体积的离散长度决定整个模型的计算结果精度。因此,在实际建模过程中需尽量避

免单元体积离散长度相差过大的情况发生,尽量统一离散长度。

此外,用户可根据视图和修改参数需要,在 map/list 选项间切换模型展示方式,也可利用管线图模式方便查看各管道及消声器外部连接接口的设置。对于非单出口的复杂结构消声器,离散时须指定进出口以及气流流动方向。

3 管道消声器三维建模

3.1 结构尺寸参数选取

管道消声器为直管式阻性消声器,穿孔管和吸声材料发挥主要阻性消声作用,抗性吸声仅体现在变径管处。以 DN80 为例,设计消声器结构参数图如图 3 所示。该管道消声器主要由出/入口、锥形连接管、套管、穿孔管、吸声材料几部分组成。声波从左端入口进入消声器,通过锥形扩张管后,进入穿孔管,在穿孔和吸声材料作用后,通过锥形收缩管,从出口流出。对部分参数选择说明如下:

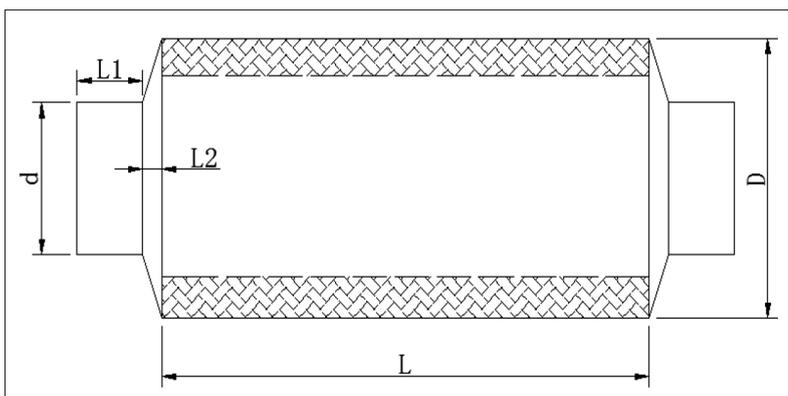


图3 管消结构参数示意图

(1) 选取消声器管道、套管的板厚均为 $\delta=1\text{mm}$ 。

(2) 考虑到该消声器进出口连接的管道参数相同,故管道消声器的进/出口短管和变径管参数相同,即出入口 d 、 L_1 、 L_2 参数相同;

(3) 穿孔管的等效直径及其截面形状。考虑到设计要求中,压力损失要求较小,因此,截面的等效直径 D_0 与入口管径的 d 尺寸限制为 $D_0 \geq d$;此时,吸声材料最大厚度 $\frac{D-D_0}{2}$ 为 27.5mm,相对于理想的厚度尺寸已偏小,因此设计时直接选用最大吸声材料厚度,此时穿孔管等效直径为 $D_0=80\text{mm}$ 。

(4) 变径管扩张角 θ 。变径管 L_2 长度影响扩张倾角,考虑到实际长度相对于理想长度值已偏小,因此尽量增大套管长度,选择 $L_2=0$ 。此外,由于该长度对消声器的总体消声效果影响不大, $L_2=0$ 有助于简化计算。

消声器 DN80 各部分结构默认初始参数如表 1 所示。表中黑体并加注下划线部分为本报告仿真所选取的主要

表1 管消结构参数表

外壳管道参数/mm		穿孔管参数		吸声材料参数	
入口直径 d	80	截面形状	圆形	材料类型	聚氨酯纤维
套管直径 D	135	穿孔管直径 D_0	80	纤维直径/mm	0.024
入口管长度 L_1	20	穿孔直径 d_p /mm	6	材料密度/(kg/m^3)	2620
变径管长度 L_2	0	穿孔率 ϕ	0.2	流阻因子	7.3
套管长度 L	160	孔排列方式	正方形	容重/(kg/m^3)	100

变量,即为影响该管道消声器的主要结构参数,包括穿孔管的截面形状、穿孔直径、穿孔数量、吸声材料的种类及容重。

3.2 消声器模型的建立

根据简化后的参数模型,在 GEM3D 中建立管道消声器的三维模型, DN80 圆管和方管的模型分别如图 4、图 5 所示,图中的点表示管道中填充有吸声材料。设定该管道消声器的工作环境温度为 294K,管内空气组成成分简化为 N_2 含量 78.5%、 O_2 含量 21.5%,环境初始大气压强为 1 个大气压。

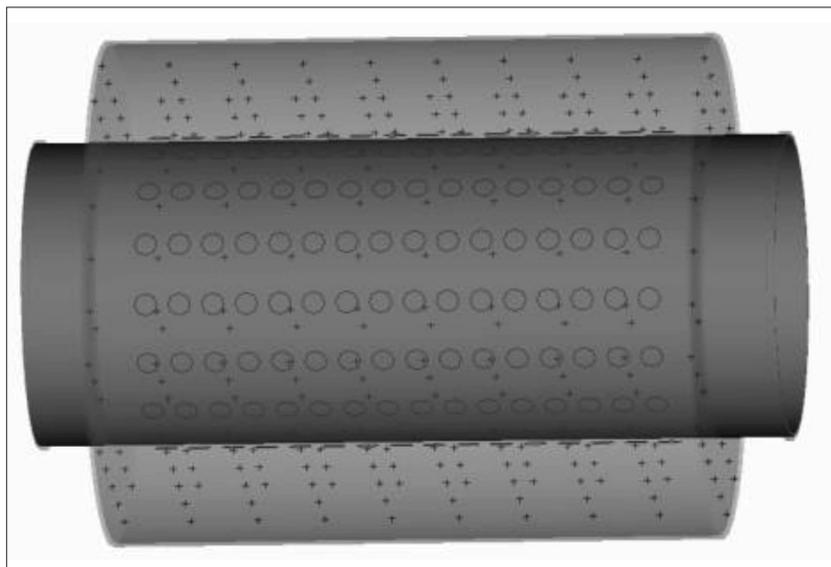


图4 DN80 消声器的 GEM-3D 模型图

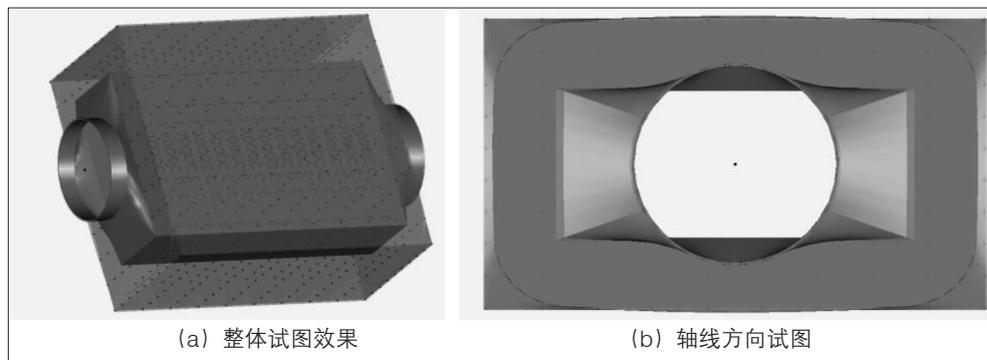


图5 DN80(方管)的 GEM-3D 模型图

对该三维模型进行离散处理,得到消声器的 *.dat 文件模型,用于后期的计算仿真如图 6 所示。

4 传递损失及背压仿真平台的建立

4.1 计算仿真平台的建立

本次仿真采用传递损失和背压为声学性能评估,GT-ISE 软件提供了计算声学性能指标的功能模块和方法。根据传递损失、插入损失的测试方法,调用模板库中的各模块,组合成所需的仿真平台。将图 6 中 *.dat 文件,导入到仿真平台封装的 Muffler-Subassembly 组件中,同时设定麦克风中的白噪声的幅值、频率等参数。在 GT-ISE 中建立传递损失仿真平台(图 7)和背压计算仿真平台(图 8),然后进行优化计算。

初始消声器基本结构已经确定,本节主要优化穿孔管的穿孔数目及孔径、吸声材料的选择及其堆装密度、变径管倾角。声学性能计算传递损失与背压,其中传递损失计算频率为 31.5~3150Hz。

图 7 中 Muffler-Subassembly 模块为图 6 中消声器网管模型的封装模块。用户对该模块内部结构的更改在图 6 中的网管模型中进行,也可在外部调用其他总成模块,故此封装大大精简了该平台的视图效果。仿真平台搭建所用到的主要模块说明如下。

(1) 白噪声发声模块(Speaker):该模块为 GT-ISE 平台自带声白噪声源,相当于白噪声器,可设置白噪声幅值、频率、气流速度等参数信息。

(2) 传递损失计算模块(TransLoss):其原理是计算两个外置麦克风之间的声压级之差,测得数据在 TransLoss 模块中计算并输出。

(3) 声压传感器(SensorCorm):在消声器的前后端分别连有 4 个声压传感器,传感器的作用是收集消声器入口端和出口端的入射声波和反射声波。

(4) 末端环境(Endout):末端环境为模拟实验室的大气环境,如气压、温度、空气成分等。

(5) 气流风机模块(EndFlowInlt):该模块是模拟发动机工况形成的气流,可以改变气流的流速、温度和气体

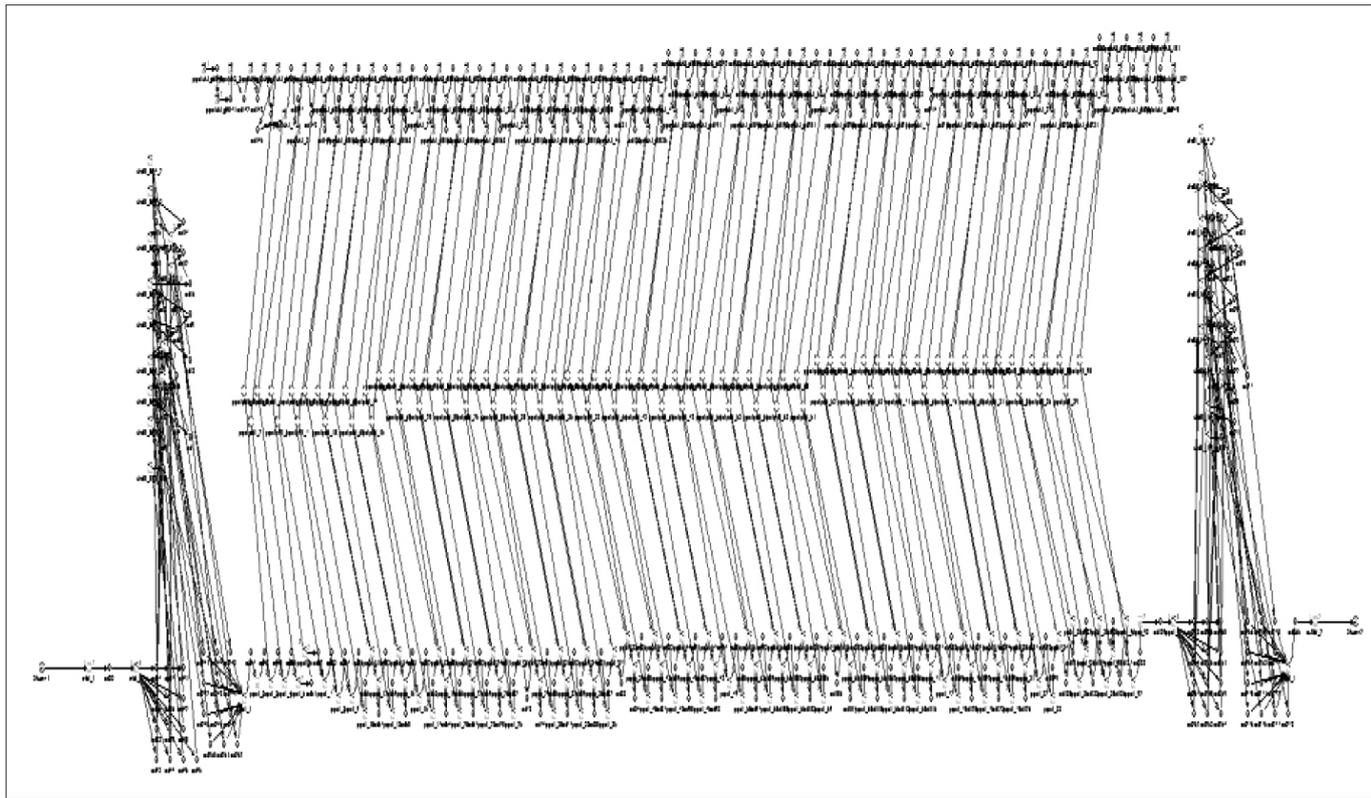


图6 消声器 *.dat 模型

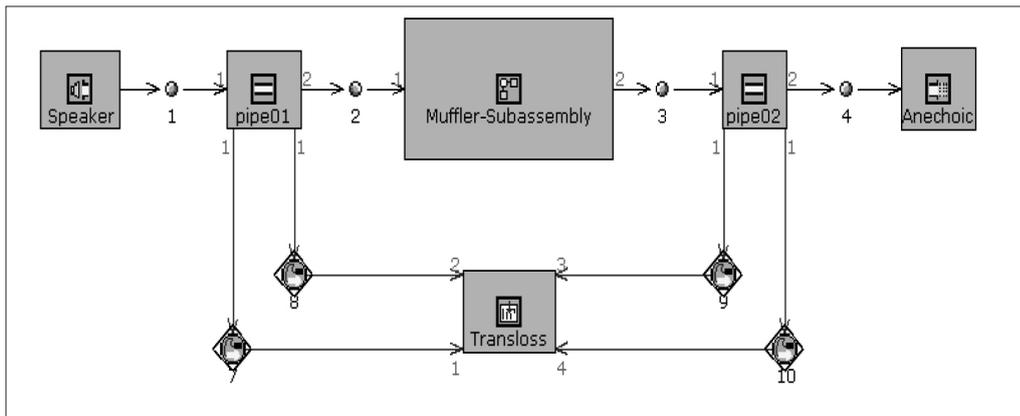


图7 传递损失仿真平台

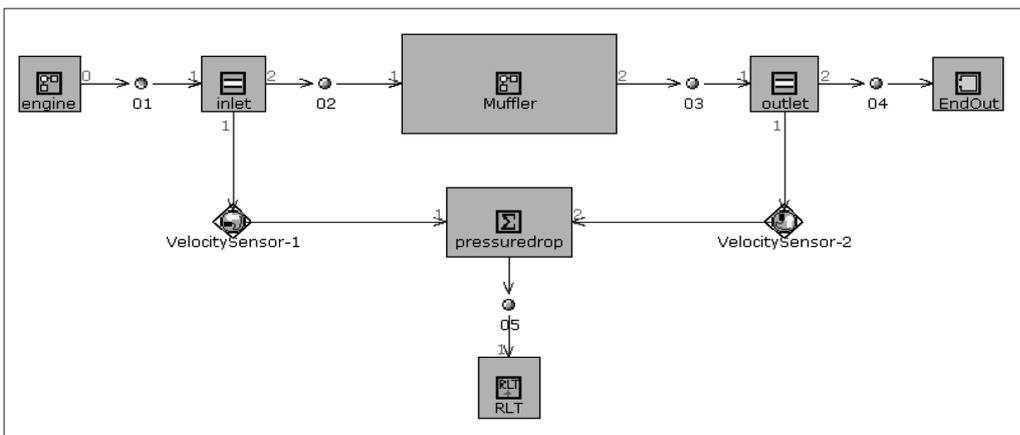


图8 背压仿真平台

成分。

(6) 储存模块 (RLT Creator): 储存运算信号以便后处理。

4.2 仿真界面设定

通过增加参数,方便设置多个不同数值;通过 Insert case(s) 选项,可为同一变量参数设置不同的数值进行仿真,这样在消声器后处理结果中可对不同案例 (case) 在同一图形或表格中展示,方便比较相应案例参数的优劣或消声效果的变化趋势。图9中示意了对白噪声发生器中的气流设置了不同平均流速的界面。在该界面中仅选取了白噪声的相关参数(平均流速、白噪声幅值)和仿真参数(仿真次数和允许运算结果波动误差)。

在改变参数进行仿真之前,需设置合适的仿真

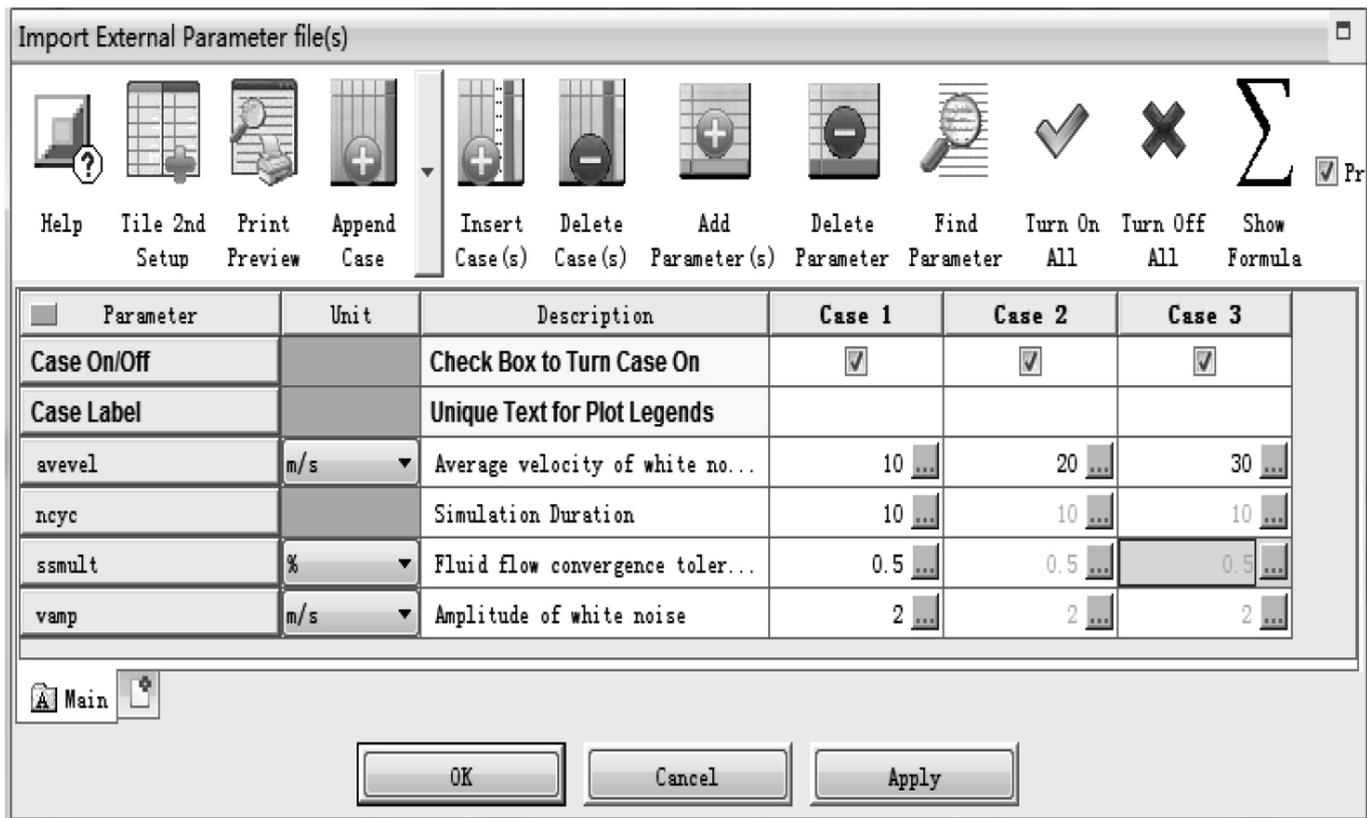


图9 仿真界面的设置

次数。仿真次数过少，所得结果的精度不足，失真过大；仿真次数过大，精度较高，运行计算所需时间过长。通过设置合理的仿真次数，可以在保证计算精度的同时，也能保证计算时间较为合理。以传递损失为例，仿真循环次数与精度的关系如表2所列。

表2 循环次数与精度的关系

循环次数	5	10	20	30	50	70	100	300
仿真时间/h	0.9	1.5	3	4.3	7	9.5	13.5	40
结果波动幅度/dB	1.2	0.7	0.4	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31

在本次试验中，传递损失的数值在3~20dB范围内，选取仿真允许的误差为0.4dB此时设置仿真循环次数为20。同理设置背压仿真计算时仿真次数为30，此时也可较好地兼顾仿真的速度和精度。

5 结语

本文利用GEM-3D平台完成排气消声器的三维建模，同时在GT-ISE平台上完成了声学计算平台的设计搭建。GEM-3D平台包含了消声器设计中使用的壳体、隔板、管道、吸声材料、穿孔等多种声学结构，并可为

其赋予材料的力学性能、材料热阻性能以及环境参数等多种参数；结合管道消声器噪声控制理论及实际计算边界条件，采用有限体积法可建立风机进出口嵌入式消声器*.dat管道模型。基于流体动力学方程及声学传递损失、背压计算原理，在GT-ISE平台中搭建传递损失仿真计算平台、背压仿真平台，并通过变量设置进行多案例同步仿真计算。此外，本文对消声器的声学结构参数和环境参数进行了简要说明，为后期仿真计算及参数的正交优化奠定基础。

参考文献：

- [1] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2002.
- [2] 乐美鑫，刘媛，蔡晓涛. 科考船机舱风机室噪声控制设计 [J]. 船舶工程，2021, 43(09)：11-14+58.
- [3] 李治国. 船用发动机排气消声器抗冲击性能优化研究 [J]. 舰船科学技术，2019, 41(24)：88-90.
- [4] 王雪仁，缪旭弘，贾地，季振林. 有流船用排气消声器声学性能分析 [J]. 噪声与振动控制，2009, 29(05)：111-115.