

SiPESC.CoLab 使用手册

目录

1 基于模态的螺栓板结构模型修正	2
1.1 目的	2
1.2 准备	2
1.3 所需文件	2
1.4 操作流程	3
2 基于频响的螺栓板结构模型修正	4
2.1 目的	4
2.2 准备	4
2.3 所需文件	4
2.4 操作流程	5
3 基于复模态的螺栓板结构模型修正	21
3.1 目的	21
3.2 准备	21
3.3 所需文件	21
3.4 操作流程	22
4 汽车频响综合算例平台操作流程	36
4.1 目的	36
4.2 准备	36
4.3 所需文件	36
4.3 操作流程	36
5 风电塔频响综合算例平台操作流程	53
5.1 目的	53
5.2 准备	53
5.3 所需文件	53
5.4 操作流程	53

第一部分 模型修正

1 基于模态的螺栓板结构模型修正

SiPESC 平台集成了模型修正的功能，既可以基于模态差异，根据试验得到的模态数据对有限元模型进行修正，也可以基于频响曲线的差异，根据试验得到的频响曲线对有限元模型进行修正，以期获得合理的有限元模型参数，使得有限元模型的模态或频响曲线与试验所得的模态或频响曲线具有良好的一致性，即使得有限元模型更接近于结构或构件的真实情况。

1.1 目的

该算例针对某螺栓板结构，基于模态对其进行有限元模型修正，修正结果显示，修正后的有限元模型的模态与试验模态高度一致，验证了 SiPESC 平台基于模态的模型修正功能的正确性。并且，使用户熟悉基于模态对有限元模型进行修正的操作过程。

1.2 准备

包含模型修正相关插件的 SiPESC 平台。

插件依赖：有限元分析、后处理、优化相关插件。

1.3 所需文件

试验模型文件：model.unvs；

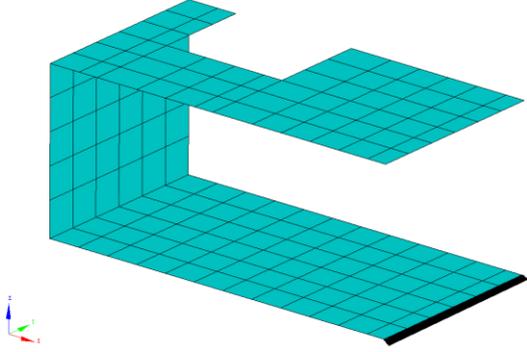
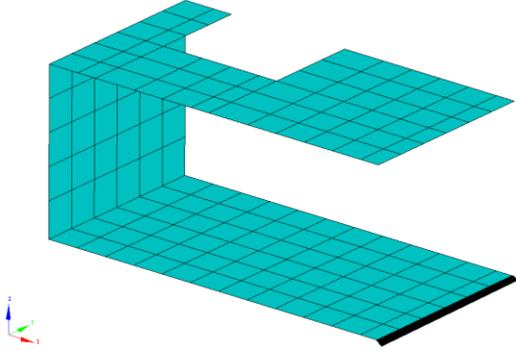
仿真模型文件：model.bdf

试验模型文件和仿真模型文件放在“**基于模态的螺栓板结构模型修正**”文件夹内，用户可以将上述文件复制到**项目文件夹**（与项目名称相同）内使用。

1.4 操作流程

(1) 模型修正问题描述。这是一个实模态模型修正问题，问题描述如表 1.1 所示。

表 1.1 基于模态的螺栓板结构模型修正问题描述

分析类型	基于模态的模型修正
目的	考核基于模态的螺栓板结构的材料属性修正
文件名	目录：~\基于模态的螺栓板结构模型修正\ 试验模型文件：model.unvs； 仿真模型文件：model.bdf
试验模型	
试验模型参数	含四节点壳单元、弹簧单元；弹簧连接刚度：各自由度均为 100000； 壳单元材料性质 1.06E7；壳单元厚度 0.1；边界条件：右下端固定；
仿真模型	
仿真模型参数	含四节点壳单元、弹簧单元；弹簧连接刚度：各自由度均为 100000； 壳单元材料性质：上、下板为 1.06E7，中间竖板为 0.56E7；壳单元厚度 0.1； 边界条件：右下端固定；
修正变量	中间竖板材料属性

(2) SiPESC 平台界面调整。首先需要调出 SiPESC 平台的模型修正功能的快捷按钮。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，弹出自定义视角的界面，如图 1.1 所示。点击上部菜单栏的“快捷数据”，在界面左侧“子菜单”的下拉菜单选择“新建”，在下面的选择区域勾选“协同仿真系统”，然

后点击右下角的“确定”，自定义视角界面关闭，完成操作。

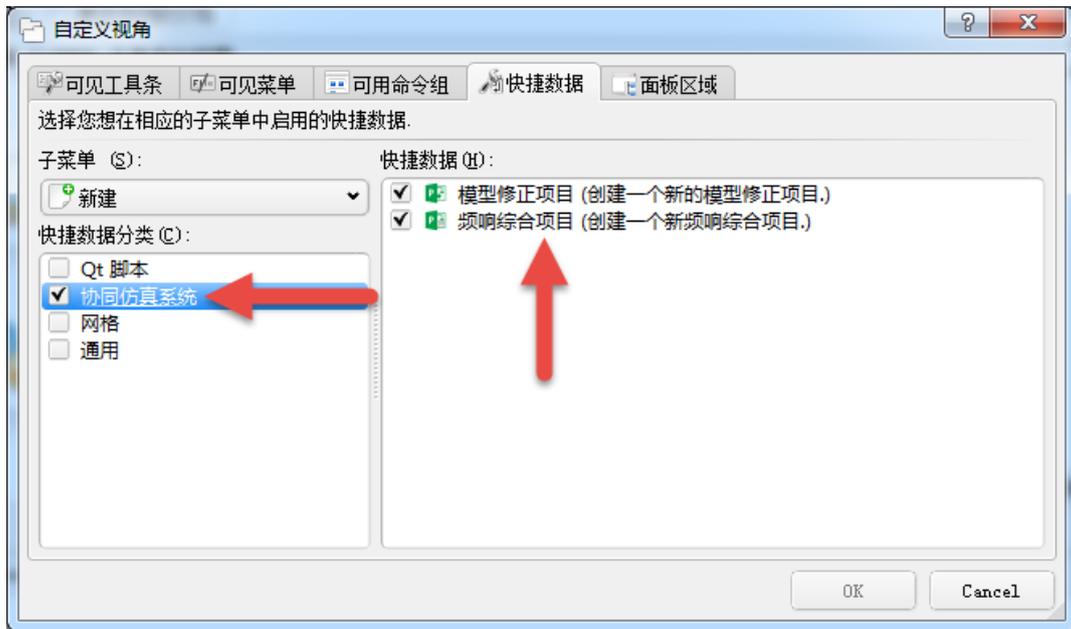


图 1.1 自定义视角界面

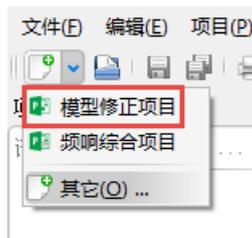


图 1.2 模型修正快捷选项

点击菜单栏“文件 (F)”下方的“新建”，或者直接点击工具栏的新建按钮，即可看到“模型修正项目”选项，如图 1.2 所示。以后便可以通过这个快捷选项来创建模型修正的工程。

为了查看模型修正过程中的变量、目标函数以及约束的变化，还需要调出“优化历史”界面。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，弹出自定义视角的界面，如图 1.1 所示。点击上部菜单栏的“快捷数据”，在界面左侧“子菜单”的下拉菜单选择“显示视图”，在下面的选择区域勾选“模型修正”，然后点击界面右下角的“确定”，自定义视角界面关闭。点击“窗口→显示视图→优化历史”，在 SiPESC 平台界面的右下角就出现了“优化历史”界面，可以左键点击“优化历史”界面的标题栏不松，拖动该界面的位置，和旁边的“问题”界面重合，再通过界面下方的按钮来回切换。

(3) 新建模型修正工程 plate_modal。点击工具栏“新建”旁边的下拉箭头，再点击“模型修正项目”，弹出新建工程对话框，如图 1.3 所示。在“项目名称”后面的文本框内输入工程名“plate_modal”。(注意：工程名的命名不能含有大写字母，否则 SiPESC 平台无法计算)



图 1.3 新建工程对话框

点击“位置”文本框右侧的文件按钮，弹出路径选择对话框，如图 1.4 所示，找到工作路径“sipesworkmu”，点击右下角“确定”按钮，返回新建工程对话框，如图 1.5 所示，点击右下角“确定”按钮，完成新工程 **plate_modal** 的创建。

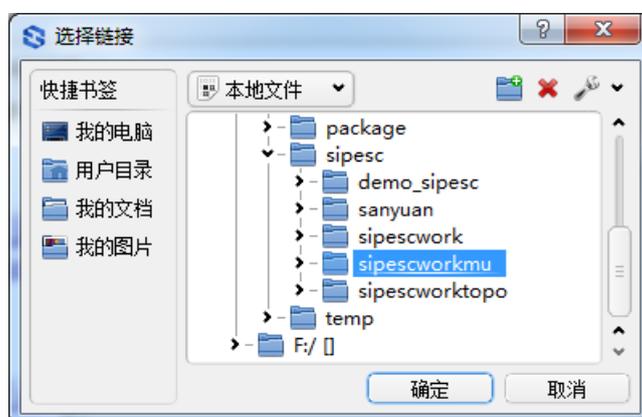


图 1.4 新建工程路径选择对话框



图 1.5 完成新工程的创建

在 SiPESC 平台主界面的左侧“项目浏览器”下可以看到新建的“**plate_modal**”，点击名称左侧的三角箭头，展开下拉菜单，如图 1.6 所示。

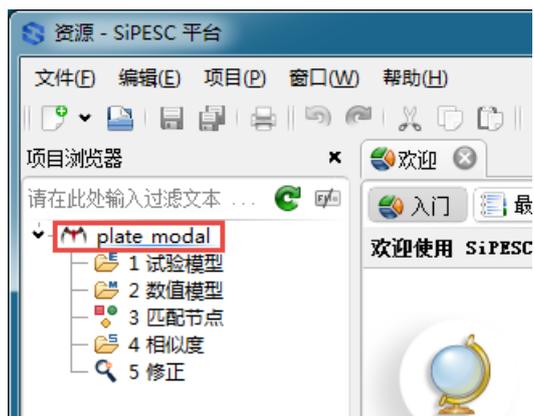


图 1.6 项目浏览器中查看 plate_modal

(4) 导入有限元模型和试验模型。

① 添加有限元模型文件。如图 1.7 所示，右键点击“2 数值模型”，在展开的下拉菜单中点击“添加仿真模型”，弹出对话框如图 1.8 所示，选中项目文件夹下的“model.bdf”文件，点击右下角的“打开”，完成有限元模型文件的添加。



图 1.7 添加有限元模型文件

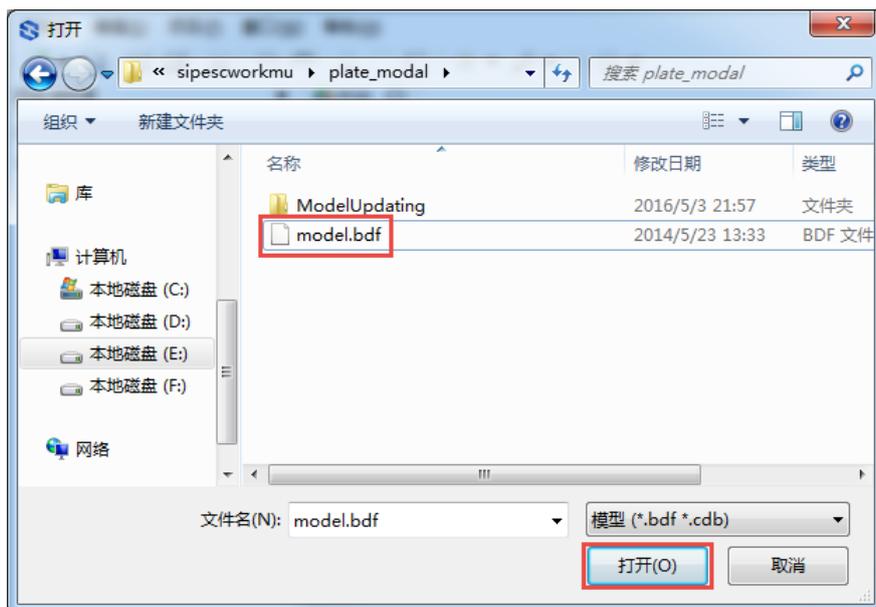


图 1.8 选择有限元模型文件

② 导入有限元模型。右键点击“2 数值模型”，选择“打开显示器”，打开网格显示器；然后右键点击“2 数值模型→导入仿真模型”，弹窗提示“有限元模型导入结束”，点击“确定”，完成有限元模型的导入。在网格显示器中可以看到有限元模型，左键点击网格显示器区域，按下左键不松，移动鼠标，即可转动视角；将光标移动到网格显示器区域，滚动滚轮，即可实现视图的缩放；同时按下鼠标左键和 shift 键，移动鼠标，可以平移模型，查看有限元模型，如图 1.9 所示。

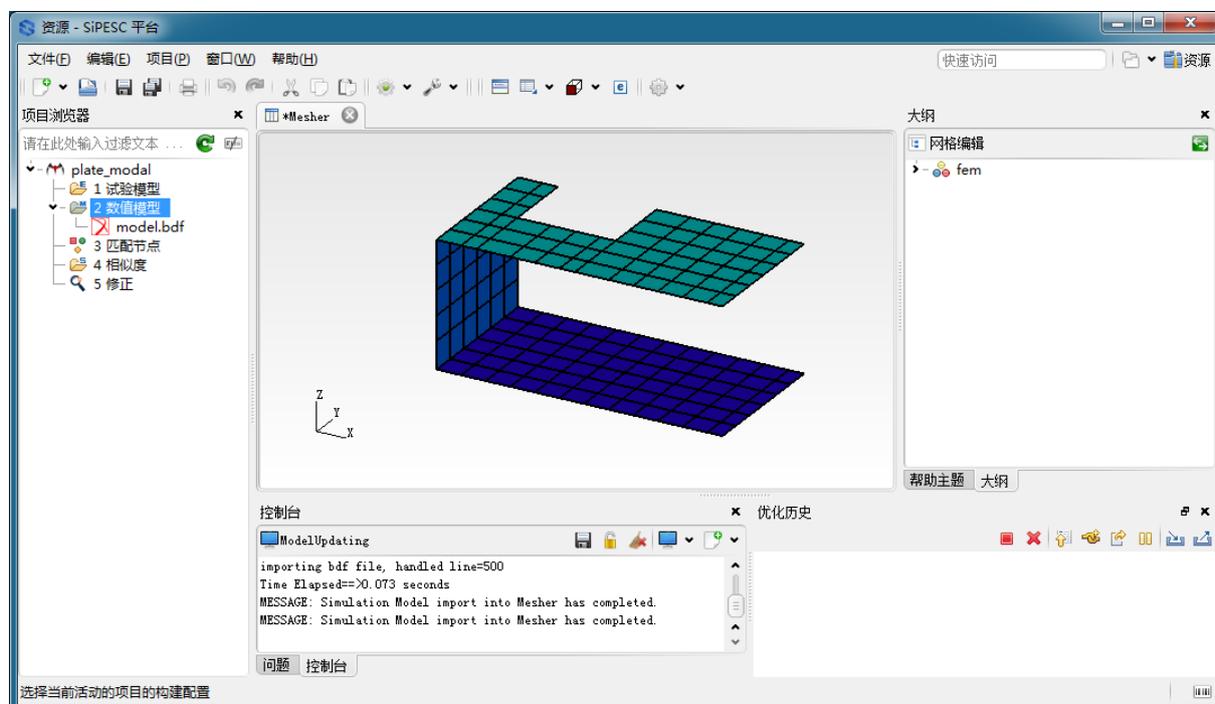


图 1.9 plate_modal 工程的有限元模型

③ 添加试验模型。右键点击“1 试验模型”，选择“添加试验模型”，弹出对话框，选择项目文件夹下的“model.unvs”文件，点击右下角的“打开”，完成试验模型文件的添加。

④ 导入试验模型。右键点击“1 试验模型”，选择“导入试验模型”，弹窗提示“试验模型导入完成”，点击“确定”，完成试验模型的导入。

⑤ 分析有限元模型。右键点击“2 数值模型”，选择“有限元分析”，几秒钟之后，弹窗提示“有限元分析结束”，点击“确定”，有限元模型计算完毕。

(5) 有限元模型与试验模型的匹配。

① 模型匹配设置。右键点击“3 匹配节点”，选择“设置基本参数”，弹出对话框，如图 1.10 所示。选择“模态分析→模态直接法→MAC”，点击“确定”，完成设置。



图 1.10 模型匹配设置

② 节点匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配节点”，弹窗提示“节点匹配完成”，点击“确定”，完成节点匹配。

③ 模态匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配模态”，弹出模态匹配对话框，如图 1.11 所示。这是有限元模型分析得到的 10 阶模态（可以将鼠标悬停在对话框的边框上，出现箭头之后，拖动箭头，调整对话框的大小，使 10 阶模态同时显示出来，否则需要滑动对话框右侧的滚动条来查看其它阶模态），选中全部 10 阶仿真模态（选中之后，对应的模态数据区域变为蓝色，如图 1.11 所示），点击右下角的“下一步”，弹出对话框如图 1.12 所示，这是试验得到的 10 阶模态，由图 1.11 和图 1.12 可以看出，仿真模态与试验模态在每一阶都有一定的差距。

选中全部 10 阶试验模态，点击“下一步”，弹出对话框如图 1.13 所示。（注意：点击图 1.12 所示对话框的左上角的灰色箭头，可以回到上一步，例如从试验结果对话框返回到仿真结果对话框）

图 1.13 显示仿真模态与试验模态的匹配关系，可以选中某一阶或几阶试验模态的阶数，点击对话框右上角的“上移”或“下移”，改变不同阶试验模态的先后顺序，来调整仿真模态与试验模态的匹配关系。这里不需要调整，点击右下角的“完成”，关闭对话框，完成仿真模态与试验模态的匹配。



图 1.11 仿真结果的模态选择

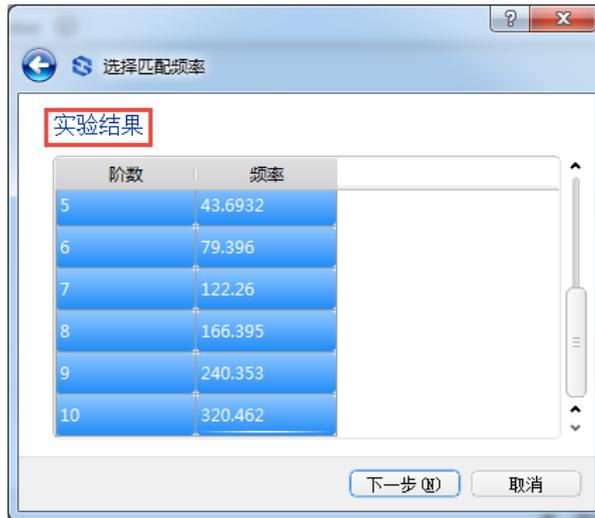


图 1.12 试验结果的模态选择

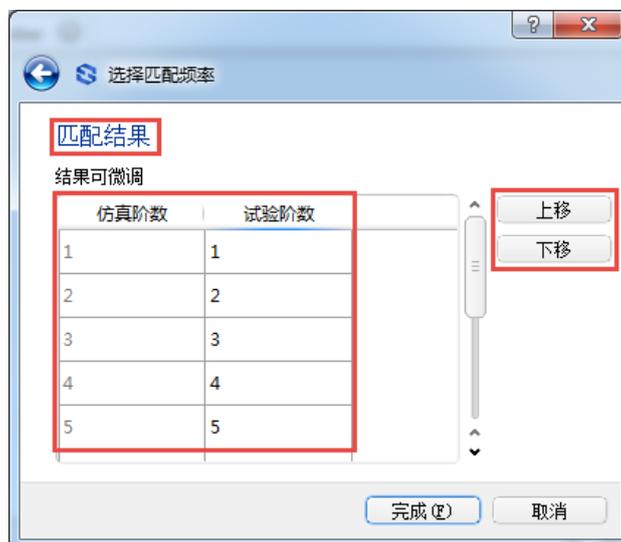


图 1.13 模态匹配

④ 自由度匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配自由度/频响曲线”，弹出对话框，如图 1.14 所示。可以点击某一个节点的某一自由度对应的绿色对勾，使之变为红色带杠圆圈，表示不匹配该自由度；反之点击某一个节点的某一自由度对应的红色带杠圆圈，使之变为绿色对勾，表示匹配该自由度。

点击 GEO ID 下面的 All，使灰色小球变成绿色对勾，能够匹配全部自由度，再点击一下，使绿色对勾变成红色带杠圆圈，取消匹配全部自由度；All 后面的一行，每一个灰色小球对应下面一列的全部自由度，而 All 下面的一列，每一个灰色小球对应后面一行的全部 6 个自由度，可以根据需要选择要匹配的自由度。这里不需要调整，直接点击“确定”，关闭对话框，完成自由度匹配。

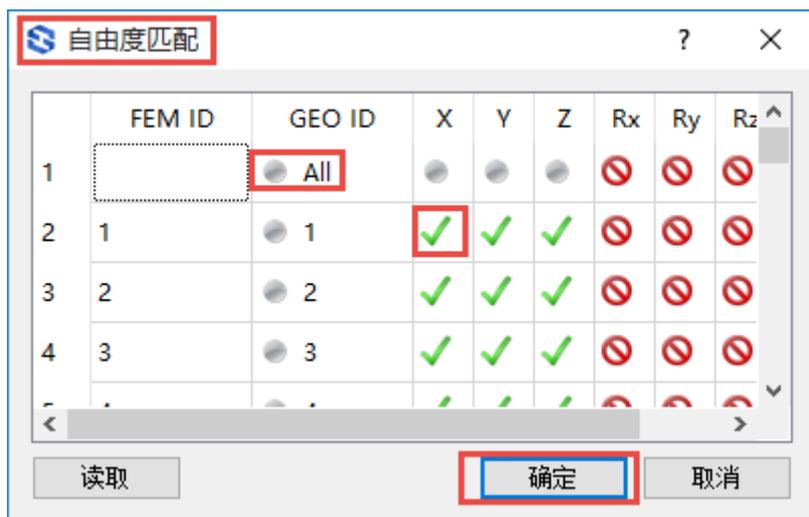


图 1.14 自由度匹配

(6) 相似度分析。

① 相似度分析。右键点击“4 相似度”，选择“计算相似度”，弹窗提示“相似度计算完成”，完成相似度分析。

② 相似度查看。右键点击“4 相似度”，选择“查看相似度”，弹出窗口如图 1.15 所示。点击右上角的“类型”下拉菜单，选择“MAC”，点击“历史”的下拉菜单选择“MAC”，这是 10 阶试验模态与仿真模态的 MAC 图，横坐标是 10 阶试验模态，纵坐标是 10 阶仿真模态。

注意：若是在优化之后，“历史”的下拉菜单可以选择查看每一步优化的“MAC*”，“*”是数字 1、2、3、4...表示优化步；这里还没有进行优化，所以就只有一个“MAC”。

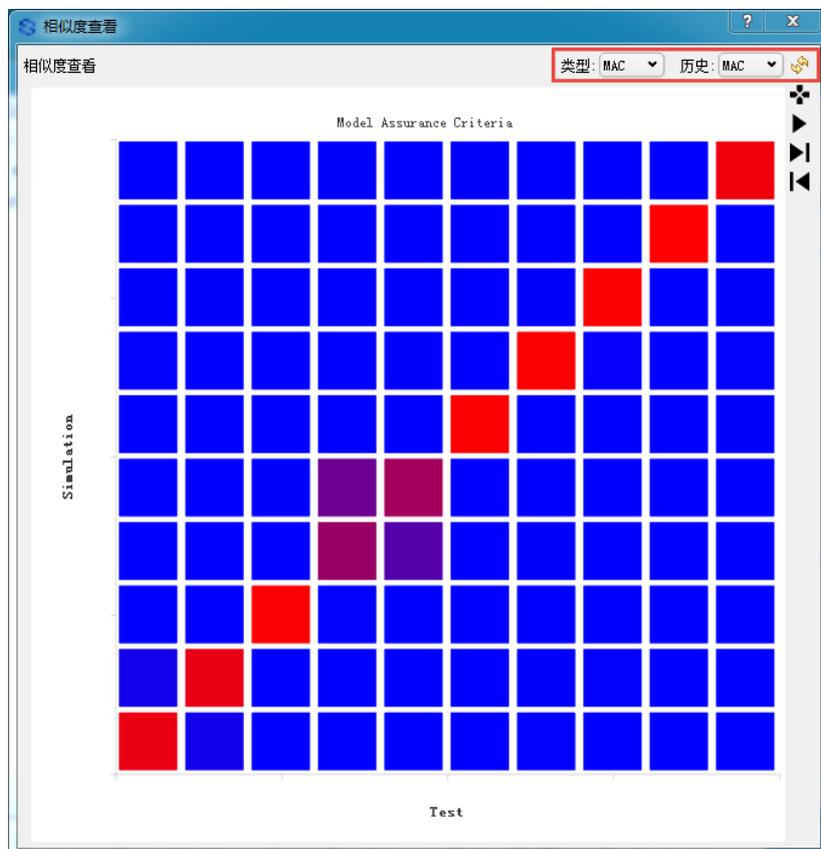


图 1.15 修正前的 MAC 图

(7) 模型修正。

① 建立优化模型。右键点击“5 修正”，选择“配置优化模型”，弹出窗口如图 1.16 所示。在建立优化模型的对话框上，要选择设计变量、目标函数、约束函数和优化算法。

点击设计变量窗口右侧的“添加”按钮，弹出对话框如图 1.17 所示，选择“MAT-2 560000 杨氏模量”（表示中间竖向板的材料的弹性模量），点击“确定”，完成设计变量的选择。

在目标函数窗口，选择“FREQLS”。

点击约束函数窗口右侧的“添加”按钮，弹出对话框如图 1.18 所示，选择“FREQ 1 ...”往下直到“FREQ 10 ...”，表示选择全部 10 阶试验模态作为优化的约束函数，点击“确定”，完成约束函数的选择。

在算法类型窗口，选择“MMA”，并且在对话框的左下角，点选“半解析”，表示采用半解析的方法求解。至此，完成优化模型的建立，如图 1.19 所示，点击右下角“确定”，关闭对话框。

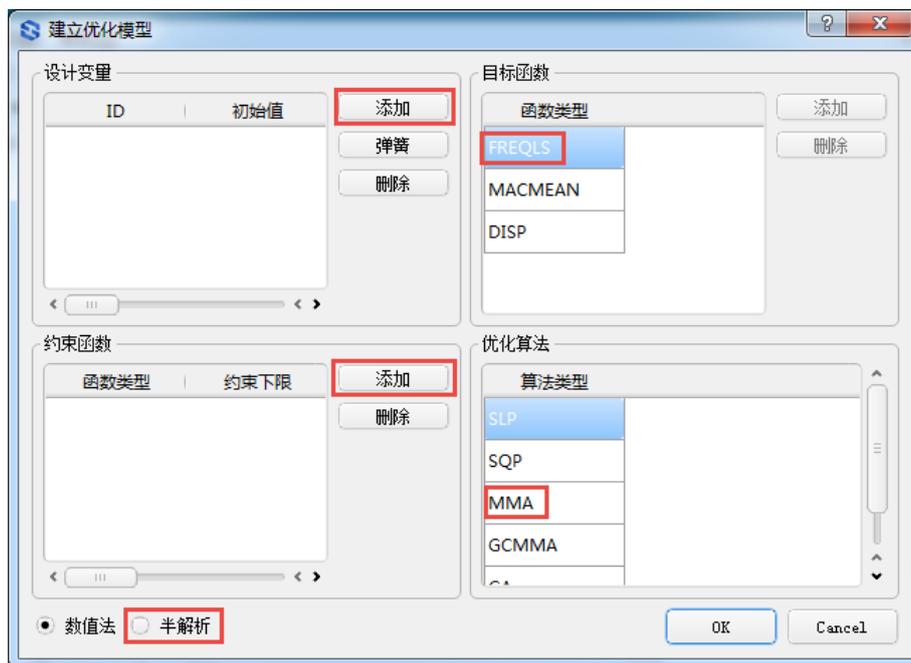


图 1.16 建立优化模型



图 1.17 选择设计变量

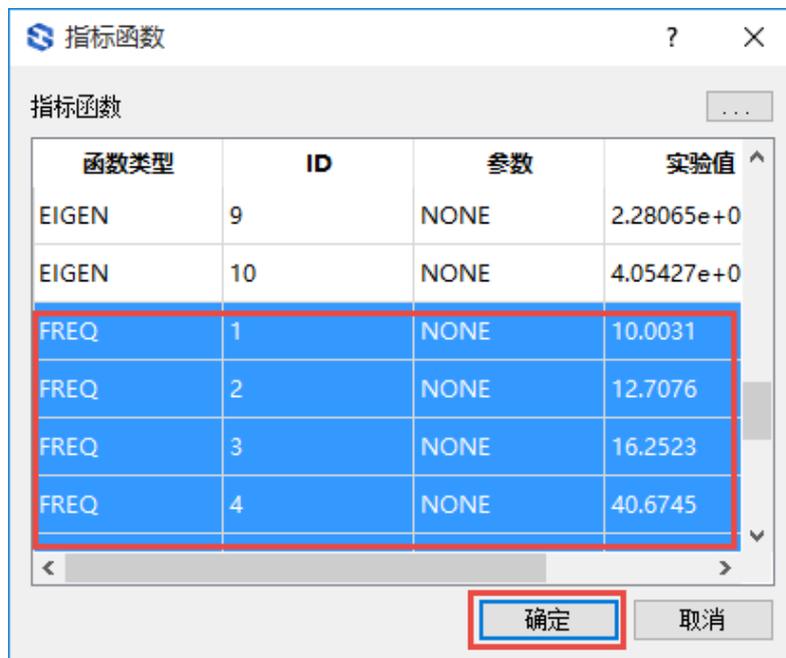


图 1.18 选择约束函数

注意，添加完设计变量之后，滑动设计变量窗口下方的滚动条，可以查看设计变量的“最小值”和“最大值”，双击“最小值”或“最大值”对应的数值，进入文本框，可以修改数值。同样，约束函数的“约束下限”和“约束上限”也可以修改。该算例对设计变量和约束函数的上下限都不进行修改。

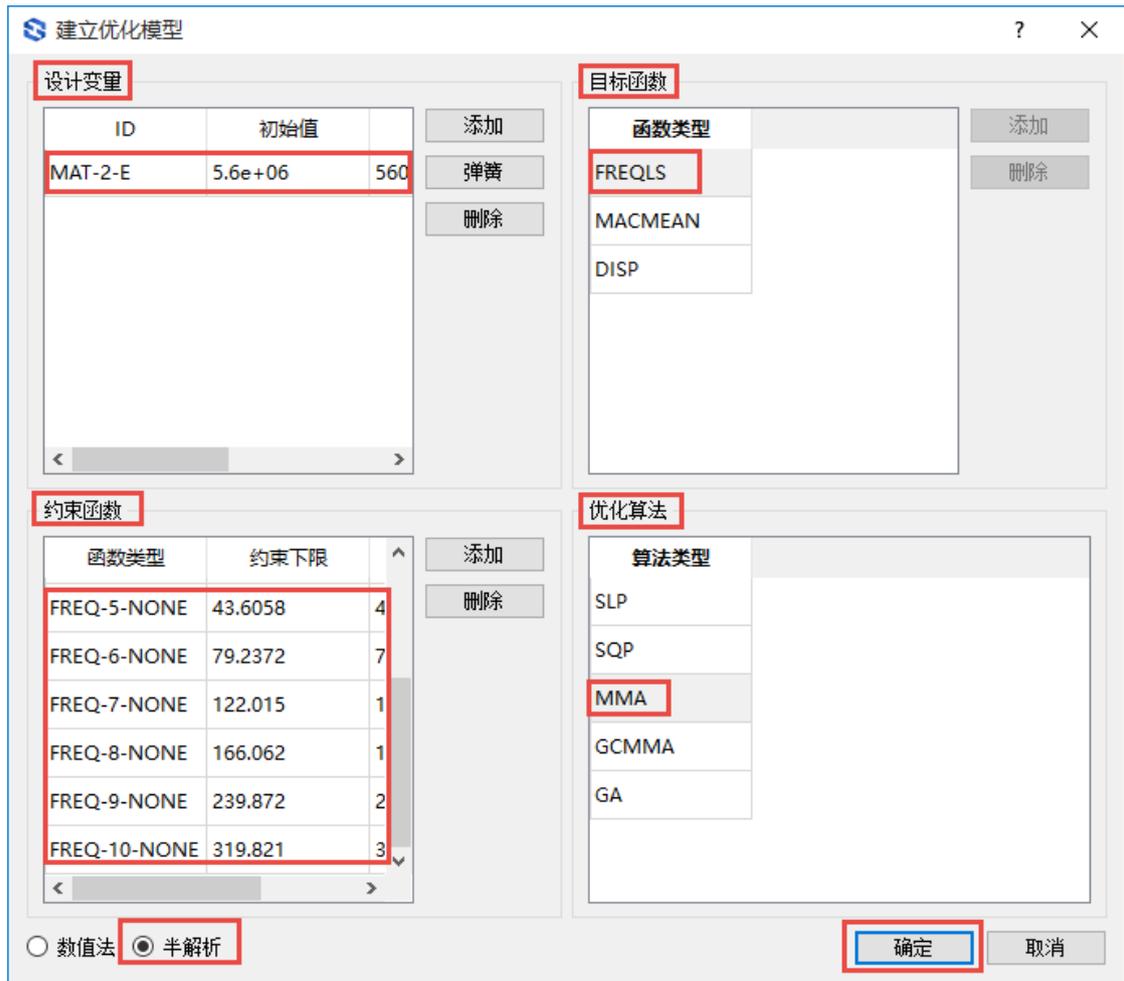


图 1.19 建好的优化模型

② 模型修正。建立好优化模型之后，开始优化，对模型进行修正。右键点击“5 修正”，选择“优化”，优化开始，经过一段时间后，弹窗提示“模型修正完成”，优化完成。

③ 查看优化结果。在优化过程中，优化历史界面会显示每一步优化的信息，如图 1.20 所示。最左边的“1”表示第一步优化，往右依次是该步设计变量值、目标函数值、约束函数值等。

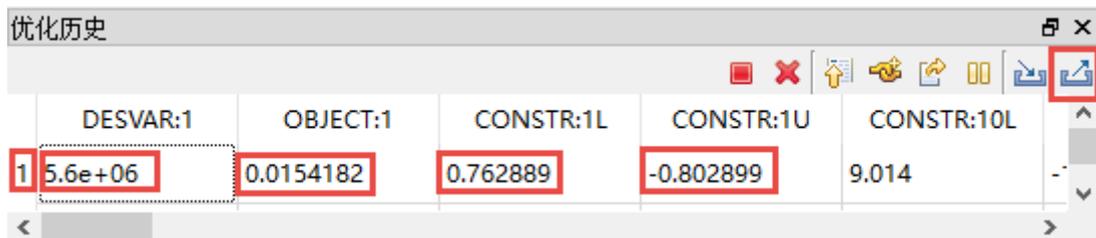


图 1.20 优化历史界面

可以将整个优化过程中，每一步的设计变量、目标函数、约束函数的取值导出来，点击优化历史界面菜单栏最右边的斜向上的箭头，弹出对话框如图 1.21 所示。“文件名”文本框输入“plate_modal_result”，保存位置选择“E:\sipesc\sipescworkmu\plate_modal”，点击右下角“保存”。该结果文件可以用 Excel 打开，可以进一步利用 Excel 绘制设计变量随优化步变化的过程图和目标函数随优化步变化的过程图，如图 1.25 和图 1.26 所示。

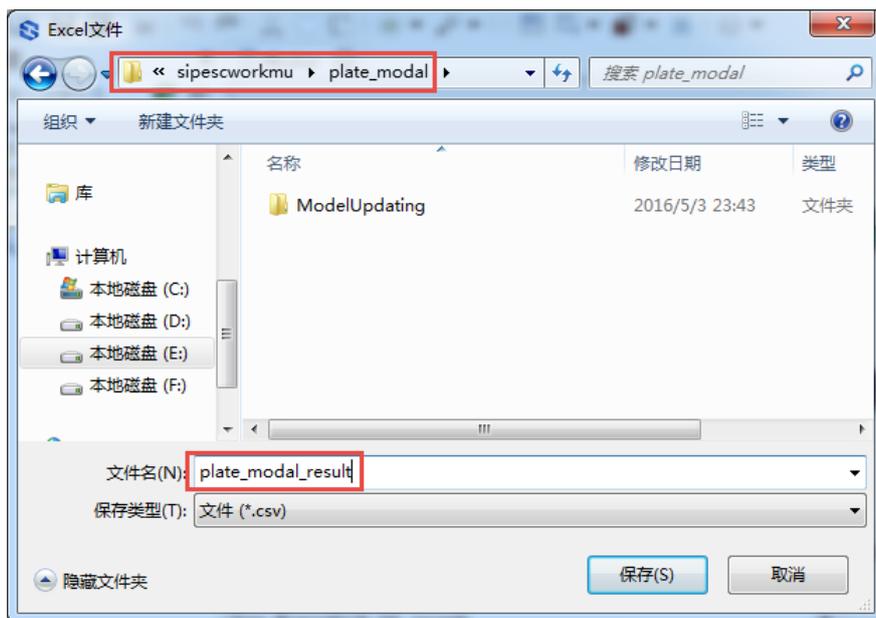


图 1.21 导出优化记录文件

优化完成后，再右键点击“4 相似度”，选择“查看相似度”，弹出窗口如图 1.22 所示，点击右上角的“类型”下拉菜单，选择“MAC”，点击“历史”的下拉菜单选择“MAC”，显示修正后 10 阶仿真模态与试验模态的 MAC 图。由图 1.22 可知，修正之后仿真模态与试验模态的相似度很高。另外，可以点击“历史”的下拉菜单，选择“MAC*”，查看某一步优化之后的 MAC 图。

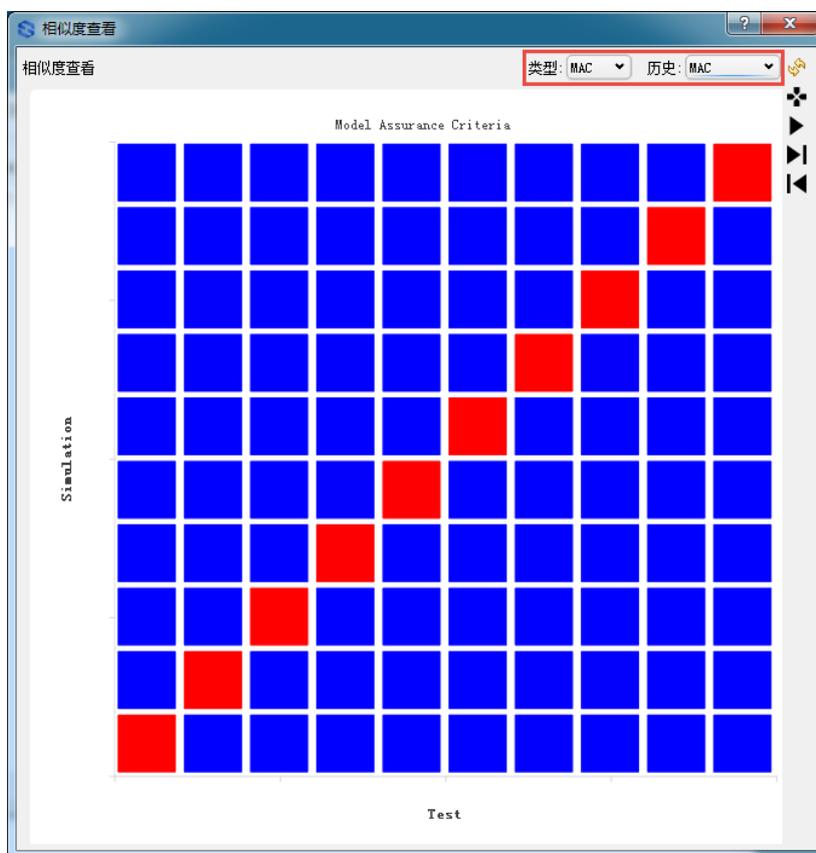


图 1.22 修正之后的 MAC 图

右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配模态”，弹出窗口如图 1.23 所示。这是修正之后的仿真

模态，与图 1.24 所示的各阶试验模态相对比，每一阶仿真模态都很接近相应的试验模态，二者之间的差距比修正之前小了很多。（修正之前，见图 1.11 和图 1.12）



图 1.23 修正之后的仿真模态



图 1.24 试验模态

图 1.25 是设计变量随优化历史变化的过程，图 1.26 是目标函数随优化历史变化的过程。最后设计变量（中间竖板的材料的弹性模量）都趋近于 $0.95E7$ ，目标函数趋近于 0。

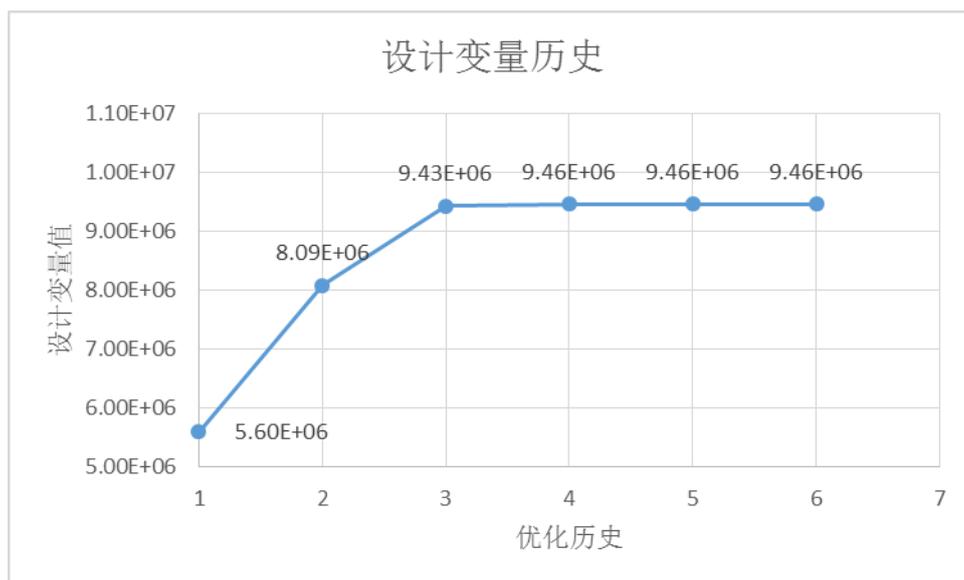


图 1.25 设计变量优化历史图

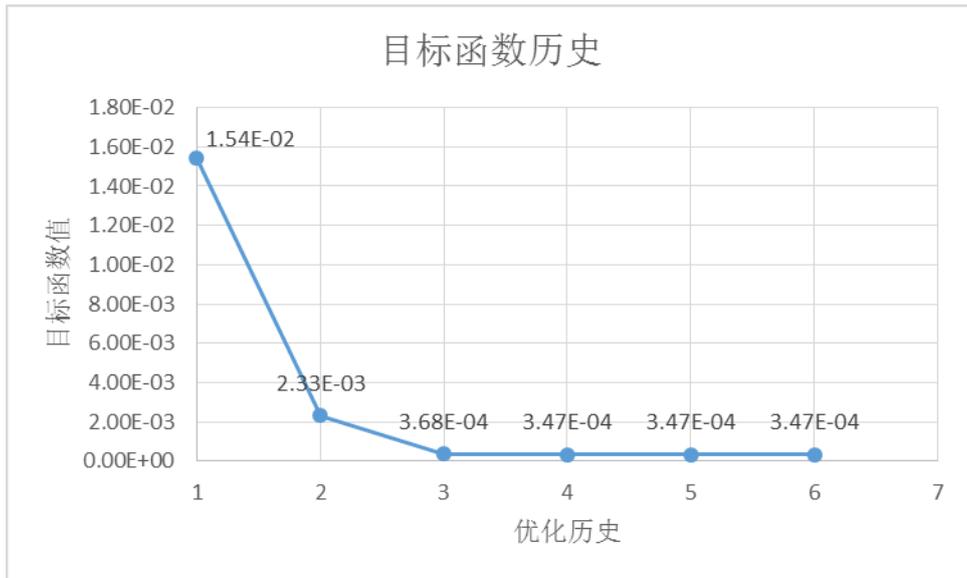


图 1.26 目标函数优化历史图

2 基于频响的螺栓板结构模型修正

SiPESC 平台集成了模型修正的功能，既可以基于模态差异，根据试验得到的模态数据对有限元模型进行修正，也可以基于频响曲线的差异，根据试验得到的频响曲线对有限元模型进行修正，以期获得合理的有限元模型参数，使得有限元模型的模态或频响曲线与试验所得的模态或频响曲线具有良好的一致性，即使得有限元模型更接近于结构或构件的真实情况。

2.1 目的

该算例针对某螺栓板结构，基于频响曲线对其进行有限元模型修正，修正结果显示，修正后的有限元模型的频响曲线与试验得到的频响曲线完全吻合，验证了 SiPESC 平台基于频响的模型修正功能的正确性。并且，使用户熟悉基于频响对有限元模型进行修正的操作过程。

2.2 准备

包含模型修正相关插件的 SiPESC 平台。

插件依赖：有限元分析、后处理、优化相关插件。

2.3 所需文件

试验模型文件：frf.unvs;

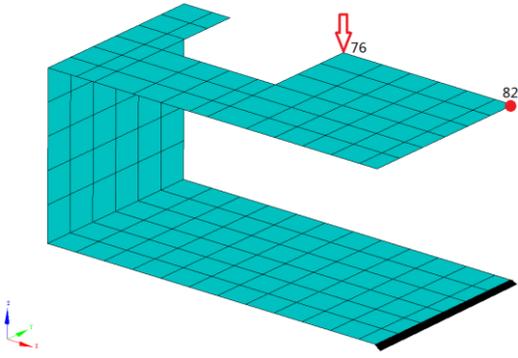
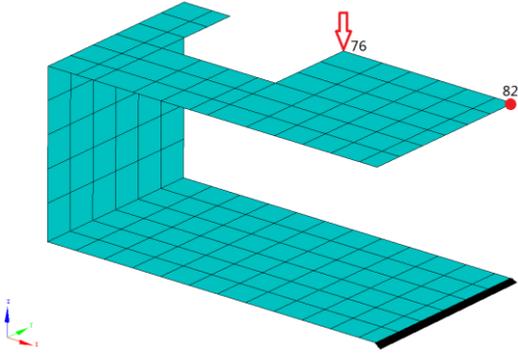
仿真模型文件：frf.bdf

试验模型文件和仿真模型文件放在“**基于频响的螺栓板结构模型修正**”文件夹内，用户可以将上述文件复制到**项目文件夹**（与项目名称相同）内使用。

2.4 操作流程

(1) 模型修正问题描述。这是一个基于频响的模型修正问题，问题描述如表 2.1 所示。

表 2.1 基于频响的螺栓板结构模型修正问题描述

分析类型	基于频响的模型修正
目的	考核基于频响的螺栓板结构的材料属性修正
文件名	目录：~\基于频响的螺栓板结构模型修正\ 试验模型文件：frf.unvs； 仿真模型文件：frf.bdf
试验模型	
试验模型参数	含四节点壳单元、弹簧单元；弹簧连接刚度：各自由度均为 100000； 壳单元材料的弹性模量为 1.06E7；1% 模态阻尼；边界条件：右下端固定； 激励点 76 号节点（Z 向），响应点 82 号节点（Z 向），加速度； 频率范围 10-250Hz，步长 2.5Hz；
仿真模型	
仿真模型参数	含四节点壳单元、弹簧单元；弹簧连接刚度：各自由度均为 100000； 壳单元材料的弹性模量：上、下板为 2.06E7，中间竖板为 1.56E7； 1% 模态阻尼；边界条件：右下端固定； 激励点 76 号节点（Z 向），响应点 82；号节点（Z 向），加速度； 频率范围 10-250Hz，步长 2.5Hz，激励幅值 1000；
修正变量	壳单元材料属性（三个，上、中、下三块板的弹性模量）

(2) SiPESC 平台界面调整。首先需要调出 SiPESC 平台的模型修正功能的快捷按钮。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，弹出自定义视角的界面，如图 2.1 所示。点击上部菜单栏的“快捷数据”，在界面左侧“子菜单”的下拉菜单选择“新建”，在下面的选择区域勾选“协同仿真系统”，然后点击右下角的“确定”，自定义视角界面关闭，完成操作。

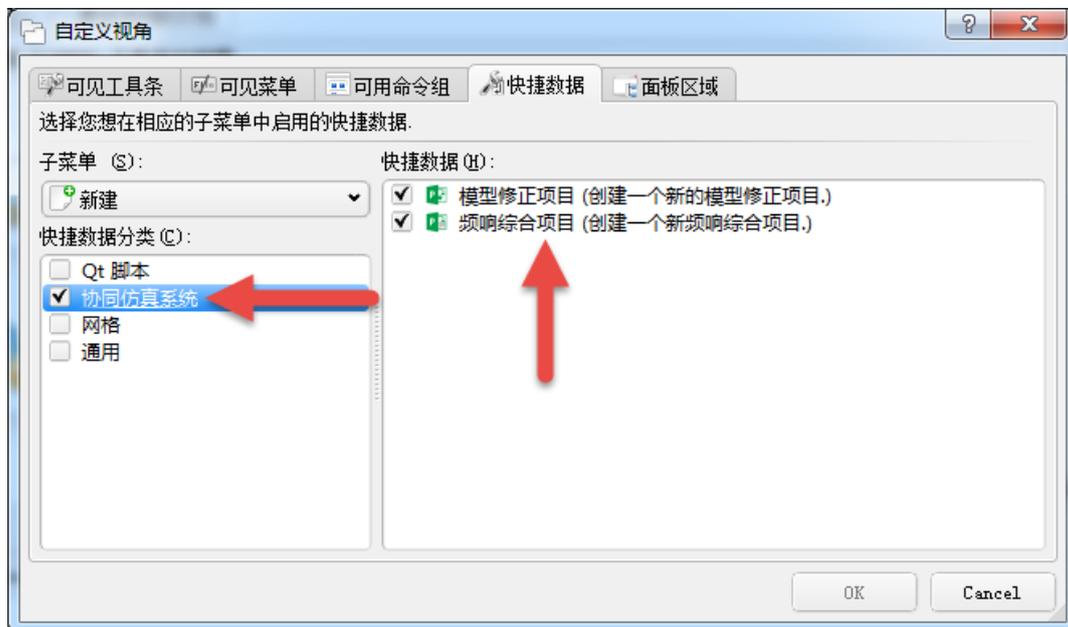


图 2.1 自定义视角界面

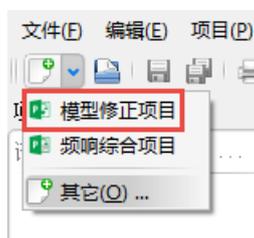


图 2.2 模型修正快捷选项

点击菜单栏“文件 (F)”下方的“新建”，或者直接点击工具栏的新建按钮，即可看到“模型修正项目”选项，如图 2.2 所示。以后便可以通过这个快捷选项来创建模型修正的工程。

为了查看模型修正过程中的变量、目标函数以及约束的变化，还需要调出“优化历史”界面。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，弹出自定义视角的界面，如图 1.1 所示。点击上部菜单栏的“快捷数据”，在界面左侧“子菜单”的下拉菜单选择“显示视图”，在下面的选择区域勾选“模型修正”，然后点击界面右下角的“确定”，自定义视角界面关闭。点击“窗口→显示视图→优化历史”，在 SiPESC 平台界面的右下角就出现了“优化历史”界面，可以左键点击“优化历史”界面的标题栏不松，拖动该界面的位置，和旁边的“问题”界面重合，再通过界面下方的按钮来回切换。

(3) 新建模型修正工程 plate_frf。点击工具栏“新建”旁边的下拉箭头，再点击“模型修正项目”，弹出新建工程对话框，如图 2.3 所示。(注意：工程名的命名不能含有大写字母，否则 SiPESC 平台无法计算)



图 2.3 新建工程对话框

点击“位置”文本框右侧的文件按钮，弹出路径选择对话框，如图 2.4 所示，找到工作路径“sipesworkmu”，点击右下角“确定”按钮，返回新建工程对话框，如图 2.5 所示，点击右下角“确定”按钮，完成新工程 **plate_frf** 的创建。

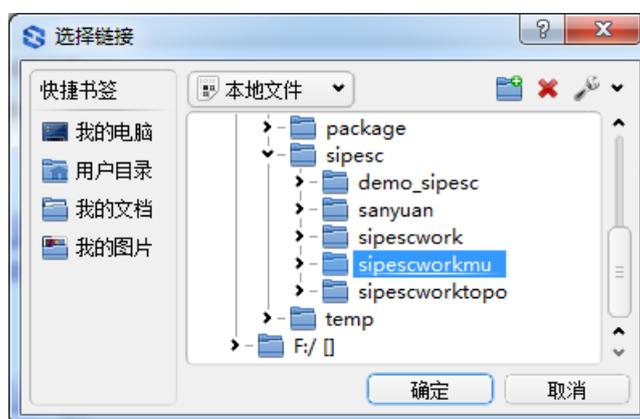


图 2.4 新建工程路径选择对话框



图 2.5 完成新工程的创建

在 SiPESC 平台主界面的左侧“项目浏览器”下可以看到新建的“**plate_frf**”，点击名称左侧的三角箭头，展开下拉菜单，如图 2.6 所示。



图 2.6 项目浏览器中查看 plate_frf

(4) 导入有限元模型和试验模型。

① 添加有限元模型文件。如图 2.7 所示，右键点击“**2 数值模型**”，在展开的下拉菜单中点击“**添加仿真模型**”，弹出对话框如图 2.8 所示，选中项目文件夹下的“**frf.bdf**”文件，点击右下角的“**打开**”，完成有限元模型文件的添加。



图 2.7 添加有限元模型文件

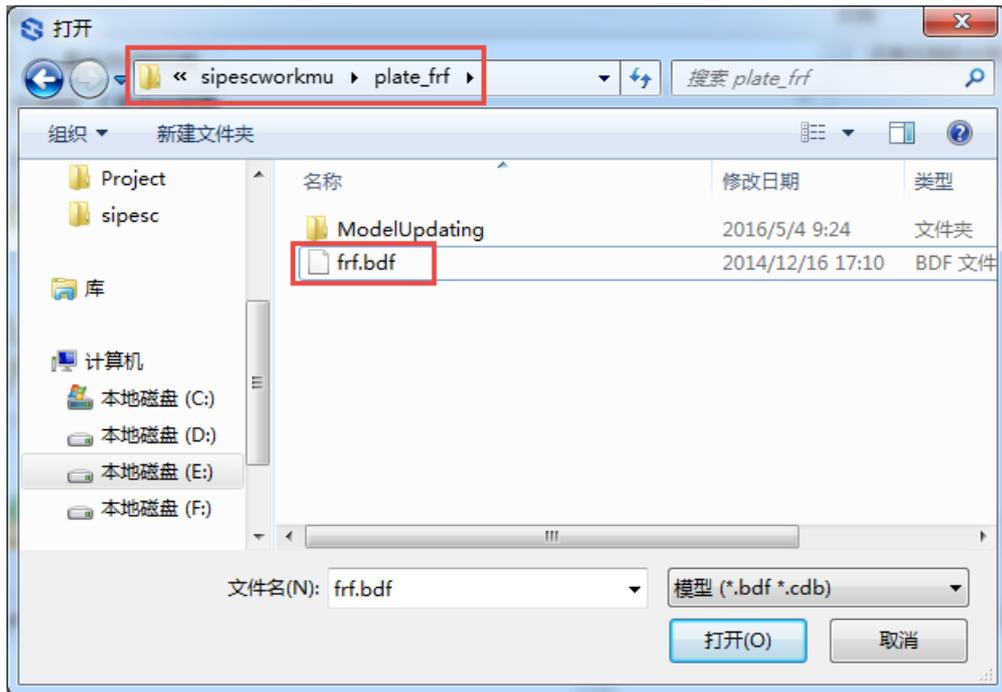


图 2.8 选择有限元模型文件

② 导入有限元模型。右键点击“2 数值模型”，选择“打开显示窗”，打开网格显示器；然后右键点击“2 数值模型→导入仿真模型”，弹窗提示“有限元模型导入结束”，点击“确定”，完成有限元模型的导入。在网格显示器中可以看到有限元模型，左键点击网格显示器区域，按下左键不松，移动鼠标，即可转动视角；将光标移动到网格显示器区域，滚动滚轮，即可实现视图的放大或缩小；同时按下鼠标左键和 shift 键，移动鼠标，可以平移模型，查看有限元模型，如图 2.9 所示。

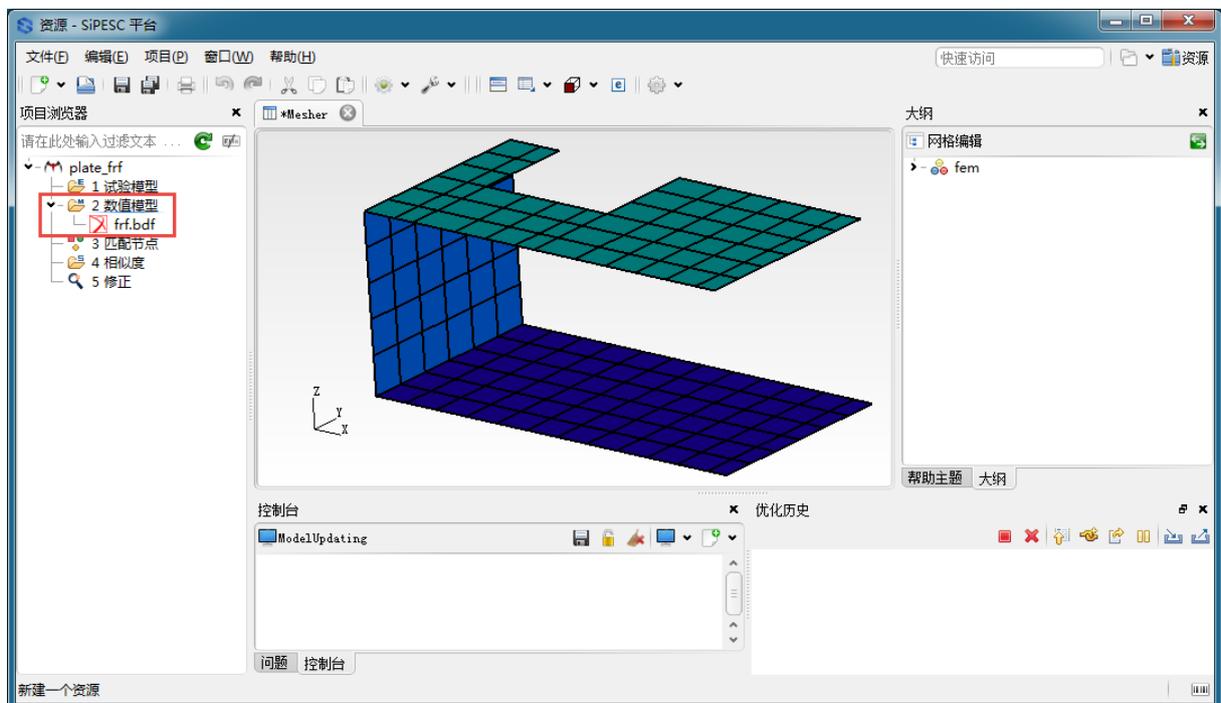


图 2.9 plate_frf 工程的有限元模型

③ 添加试验模型。右键点击“1 试验模型”，选择“添加试验模型”，弹出对话框，选择 项目文件夹下的“frf.unvs”文件，点击右下角的“打开”，完成试验模型文件的添加。

④ 导入试验模型。右键点击“1 试验模型”，选择“导入试验模型”，弹窗提示“试验模型导入完成”，点击“确定”，完成试验模型的导入。

⑤ 分析有限元模型。右键点击“2 数值模型”，选择“有限元分析”，随后弹出对话框，要求选择激励点和响应点，如图 2.10 所示。先添加激励点，点击右侧“添加”，弹出对话框如图 2.11 所示，“节点 IDs”文本框输入“76”，下面的自由度选择“Z”，点击“应用”，再点击“关闭”，完成激励点的添加。再添加响应点，在顶部的菜单栏“激励点/响应点”切换到“响应点”，点击右侧“添加”，在弹出的对话框中，“节点 IDs”文本框输入“82”，下面的自由度选择“Z”，点击“应用”，再点击“关闭”，完成响应点的添加。窗口左下角的“响应比例”输入 1000，点击右下角的“确定”，窗口关闭，完成激励响应点的选择。程序继续进行有限元模型的分析。随后，弹窗提示“有限元分析结束”，点击“确定”，有限元模型计算完毕。



图 2.10 选择激励响应点



图 2.11 选择激励点

下面介绍如何在 Mesher 窗口中选择节点。点击菜单栏“显示/隐藏工具箱”，该快捷按钮的位置如图 2.12 所示，前提是必须打开 Mesher 窗口。然后在 Mesher 窗口左侧弹出网格编辑器工具箱，如图 2.13 所示。选择弹窗底部的“图形显示”，在操作面板点击“选择设置→选择类型→节点”，即可在 Mesher 窗口点击拾取节点（若选择其它类型，也可以拾取其它类型的元素）。注意：左键单击节点一次，节点变为红色，是选取，再点击节点一次，红色消失，取消选择。

上文所述的选择激励响应点，既可以输入节点编号来选取，也可以按上述操作在 Mesher 窗口直接拾取。若采取 Mesher 窗口拾取的方法选择激励点和响应点，先选择激励点，再选择响应点，注意：在选择响应点的时候，在 Mesher 窗口再点击一下 76 号点（激励点），使红色消失，把它反选掉，再点击 82 号点，选择响应点。



图 2.12 显示/隐藏工具箱按钮

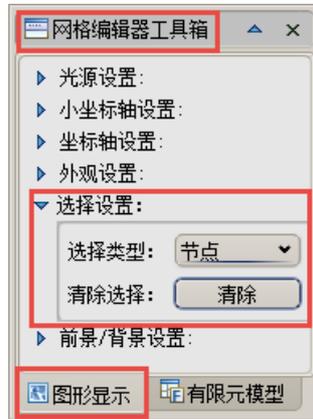


图 2.13 在 Mesher 窗口选择节点

(5) 有限元模型与试验模型的匹配。

① 模型匹配设置。右键点击“3 匹配节点”，选择“设置基本参数”，弹出对话框，如图 2.14 所示。选择“频响分析→频率截断法→CSF”，点击“确定”，完成设置。

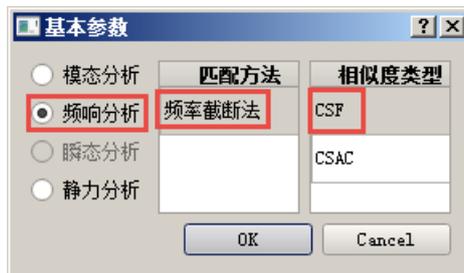


图 2.14 模型匹配设置

② 节点匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配节点”，弹窗提示“节点匹配完成”，点击“确定”，完成节点匹配。

③ 模态匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配模态”，弹出模态匹配对话框，如图 2.15 所示。这是有限元模型分析得到的 30 阶模态（可以滑动对话框右侧的滚动条来查看其它阶模态），选中全部 30 阶仿真模态（选中之后，对应的模态数据区域变为蓝色），点击右下角的“下一步”，弹出对话框如图 2.16 所示，这是试验得到的 30 阶模态，由图 2.15 和图 2.16 可以看出，仿真模态与试验模态在每一阶都有一定的差距。

选中全部 30 阶试验模态，点击“下一步”，弹出对话框如图 2.17 所示。（注意：点击图 2.16 所示对话框的左上角的箭头，可以回到上一步，例如从试验结果对话框返回到仿真结果对话框）

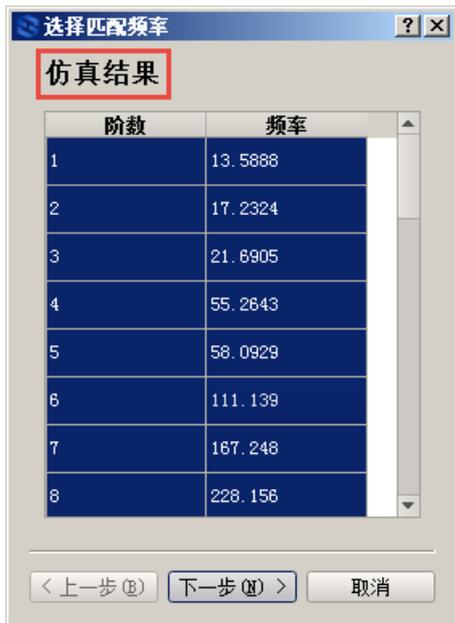


图 2.15 仿真结果的模态选择



图 2.16 试验结果的模态选择



图 2.17 模态匹配

图 2.17 显示仿真模态与试验模态的匹配关系，可以选中某一阶或几阶试验模态的阶数，点击对话框右上角的“上移”或“下移”，改变不同阶试验模态的先后顺序，来调整仿真模态与试验模态的匹配关系。这里不需要调整，点击右下角的“完成”，关闭对话框，完成仿真模态与试验模态的匹配。

④ 频响曲线匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配自由度/频响曲线”，弹出对话框，如图 2.18 所示。右下角“仿真模型”选择“1~(82,3)~(76,3)”，表示第一组响应点和激励点，82 是响应点的节点号，3 是自由度编号，76 是激励点的节点号，该算例中只有这一组激励响应；“试验模型”选择“246~(82,3)~(0,0)”，其中响应点及其自由度要和仿真模型中的相匹配，而激励点全是 (0, 0) 是因为该算例的试验数据文件 frf.unvs 中没有定义激励点。点击“添加”，弹出窗口，显示修正前的仿真模型与试验模型的频响曲线对比（激励点 76 号节点，Z 向，响应点 82 号节点，Z 向），如图 2.19 所示，蓝色曲线是试验模型的频响曲线，绿色曲线是仿真模型的频响曲线，二者有较大的偏差。

注意：“仿真模型”和“试验模型”的响应点和激励点必须匹配。仿真模型中的节点与试验模型中的节点的对应关系如弹窗左侧所示，“FEM ID”下面一系列的编号是仿真模型中的节点号，“GEO ID”下面一系列的编号是试验模型中的节点号，可以通过“仿真模型”的响应点和激励点的编号来查找对应的试验模型的响应点和激励点的编号，从而选择正确的“试验模型”。

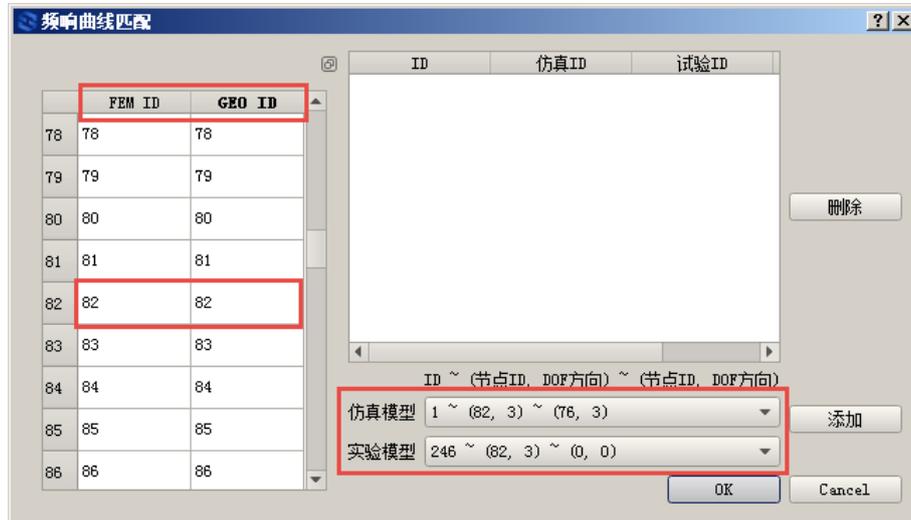


图 2.18 自由度匹配

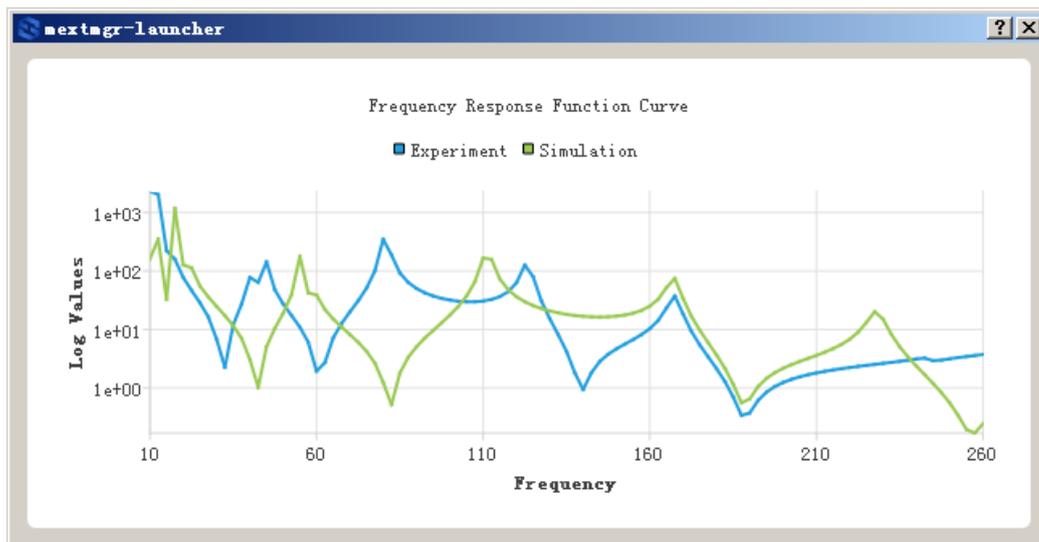


图 2.19 修正前的频响曲线对比

关闭修正前的频响曲线对比图，回到图 2.18 所示窗口，点击右下角“确定”，完成频响曲线的匹配。（注意：频响曲线匹配的时候，一定要先“添加”，再“确定”）

(6) 相似度分析。

① 相似度分析。右键点击“4 相似度”，选择“计算相似度”，弹窗提示“相似度计算完成”，完成相似度分析。

② 相似度查看。右键点击“4 相似度”，选择“查看相似度”，弹出窗口如图 2.20 所示。点击右上角的“类型”下拉菜单，选择“CSF”，点击“历史”的下拉菜单选择“CSF”，这是仿真频响曲线与试验频响曲线的幅值相似度曲线，图 2.20 说明，仿真频响曲线与试验频响曲线之间的偏差很大。

注意：若是在优化之后，“History”的下拉菜单可以选择查看每一步优化的“CSF*”，“*”是数字 1、2、3、4...表示优化步；这里还没有进行优化，所以就只有一个“CSF”。

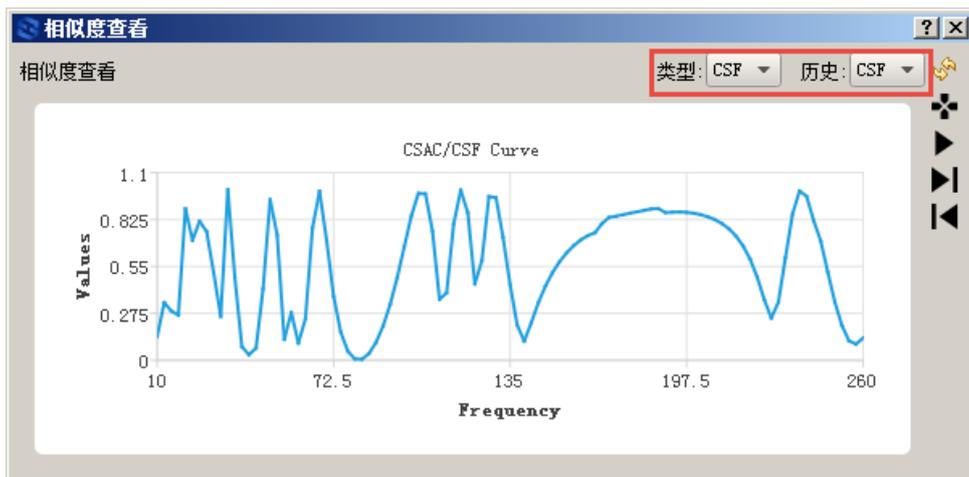


图 2.20 修正前的 CSF 图

(7) 模型修正。

① 建立优化模型。右键点击“5 修正”，选择“配置优化模型”，弹出窗口如图 2.21 所示。在建立优化模型的对话框上，要选择设计变量、目标函数、约束函数和优化算法。

点击设计变量窗口右侧的“添加”按钮，弹出对话框如图 2.22 所示，选择“MAT-1 20600000 杨氏模量”、“MAT-2 15600000 杨氏模量”、“MAT-3 20600000 杨氏模量”（表示上、中、下三块板的材料的弹性模量），点击“确定”，完成设计变量的选择。

在目标函数窗口，选择“FREQLS”。

点击约束函数窗口右侧的“添加”按钮，弹出对话框如图 2.23 所示，选择“CSF 1 ...”往下直到“CSF 101 ...”，并且选择“FREQ 1 ...”往下直到“FREQ 10 ...”，表示选择全部 101 个 CSF 值和前 10 阶试验模态作为优化的约束函数，点击“确定”，完成约束函数的选择。

在算法类型窗口，选择“MMA”，并且在对话框的左下角，点选“半解析”，表示采用半解析的方法求解。至此，完成优化模型的建立，如图 2.24 所示，点击右下角“确定”，关闭对话框。



图 2.21 建立优化模型



图 2.22 选择设计变量



图 2.23 选择约束函数

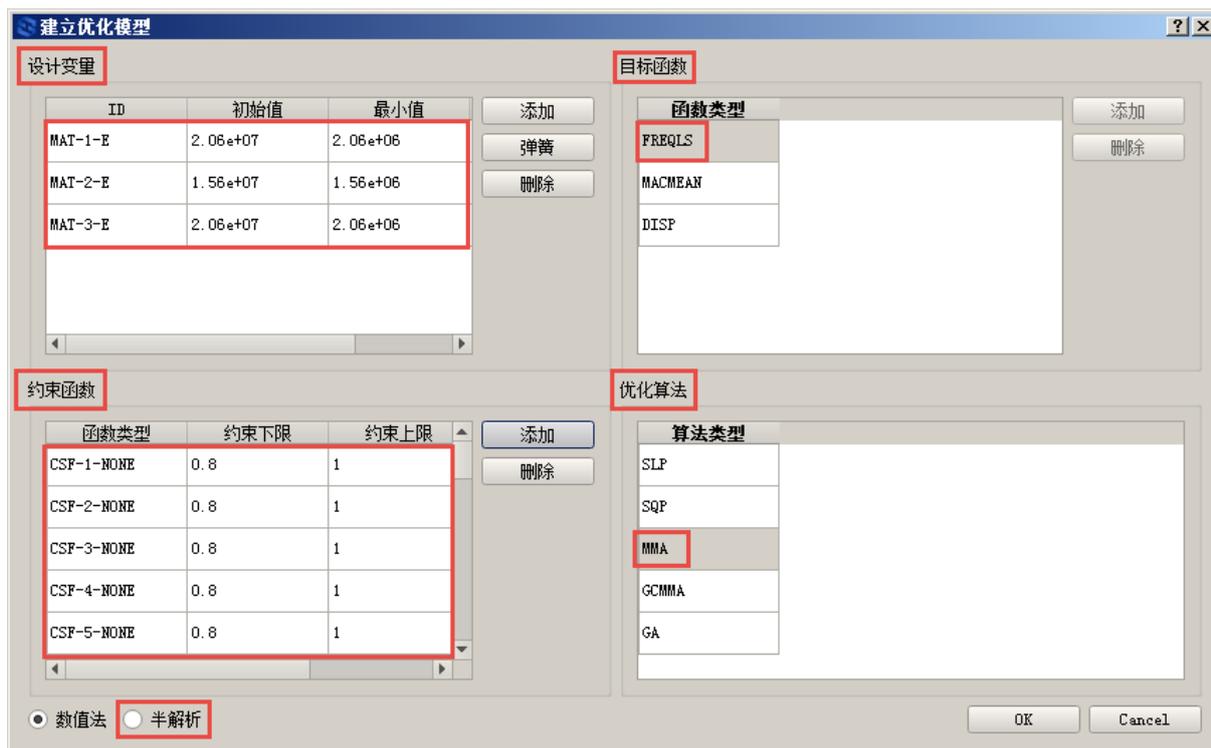


图 2.24 建好的优化模型

注意：添加完设计变量之后，滑动设计变量窗口下方的滚动条，可以查看设计变量的“最小值”和“最大值”，双击“最小值”或“最大值”对应的数值，进入文本框，可以修改数值。同样，约束函数的“约束下限”和“约束上限”也可以修改。该算例对设计变量和约束函数的上下限都不进行修改。

② 模型修正。建立好优化模型之后，开始优化，对模型进行修正。右键点击“5 修正”，选择“优化”，优化修正开始，经过一段时间后，弹窗提示“模型修正完成”，修正完成。

③ 查看优化结果。在优化过程中，优化历史界面会显示每一步优化的信息，如图 2.25 所示。最左边的“1”表示第一步优化，往右依次是该步设计变量 1 的值、设计变量 2 的值、设计变量 3 的值、目标函数值、约束函数值等。

	DESVAR:1	DESVAR:2	DESVAR:3	OBJECT:1	CONSTR:1L
1	2.06e+07	1.56e+07	2.06e+07	0.716398	0.662064

图 2.25 优化历史界面

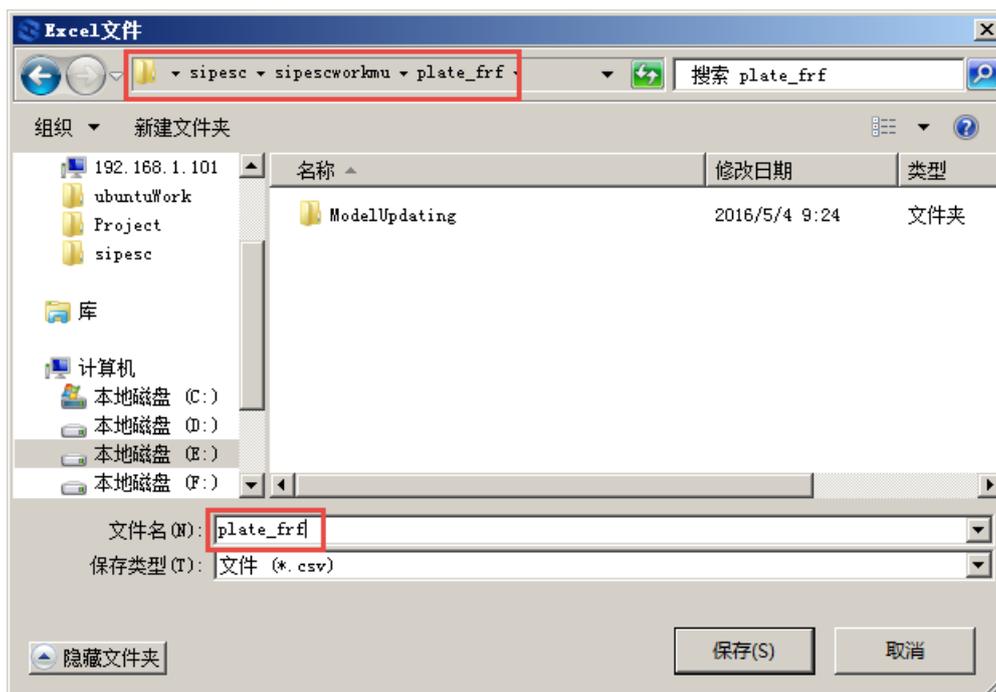


图 2.26 导出优化记录文件

可以将整个优化过程中，每一步的设计变量、目标函数、约束函数的取值导出来，点击优化历史界面菜单栏最右边的斜向上的箭头，弹出对话框如图 2.26 所示。“文件名”文本框输入“plate_frf”，保存位置选择“E:\sipesc\sipescworkmu\plate_frf”，点击右下角“保存”。该结果文件可以用 Excel 打开，可以进一步利用 Excel 绘制设计变量随优化步变化的过程图和目标函数随优化步变化的过程图，如图 2.31、图 2.32、图 2.33 和图 2.34 所示。

优化完成后，再右键点击“4 相似度”，选择“查看相似度”，弹出窗口如图 2.27 所示，点击右上角的“类型”下拉菜单，选择“CSF”，点击“历史”的下拉菜单选择“CSF”，显示修正后的 CSF 图。由图 2.27 可知，修正之后，CSF 图趋近于一条水平线，值近似为 1，说明仿真频响曲线与试验频响曲线高度一致。另外，可以点击“历史”的下拉菜单，选择“CSF*”，查看某一步优化之后的 CSF 图。

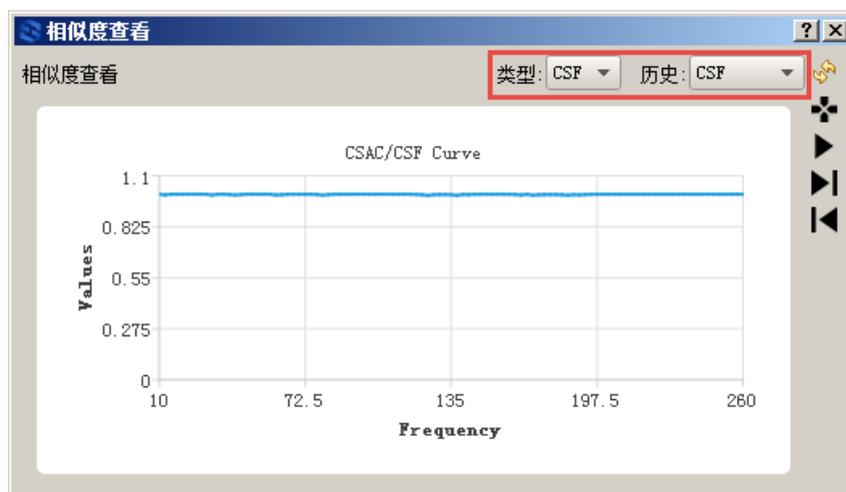


图 2.27 修正之后的 CSF 图

右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配模态”，弹出窗口如图 2.28 所示。这是修正之后的仿真模态，与图 2.29 所示的各阶试验模态相对比，每一阶仿真模态都很接近相应的试验模态，二者之间

的差距比修正之前小了很多。(修正之前, 见图 2.15 和图 2.16)

右键点击“3 匹配节点”, 选择“匹配自由度/频响曲线”, 弹出频响曲线匹配对话框, “仿真模型”选择“1~(82,3)~(76,3)”, “试验模型”选择“246~(82,3)~(0,0)”, 点击“添加”, 显示修正后的频响曲线对比图, 如图 2.30 所示, 修正之后, 仿真模型的频响曲线与试验模型的频响曲线完全重合, 说明模型修正达到了良好的效果, 点击“取消”关闭窗口。



阶数	频率
1	10.0065
2	12.7373
3	16.269
4	40.8247
5	43.918
6	80.4643
7	123.163
8	167.107

图 2.28 修正之后的仿真模态



阶数	频率
1	10.0262
2	12.7624
3	16.3011
4	40.9053
5	44.0045
6	80.6234
7	123.407
8	167.437

图 2.29 试验模态

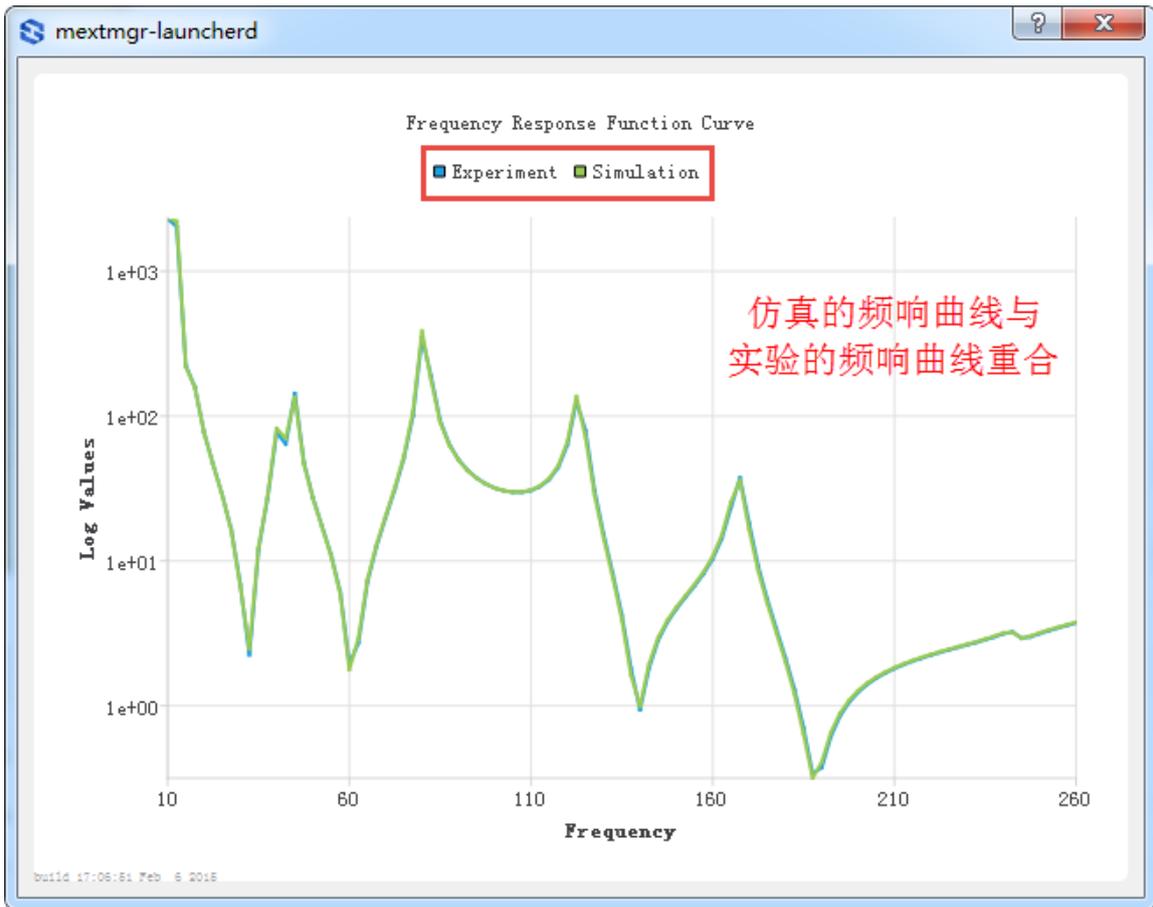


图 2.30 修正后的频响曲线对比

图 2.31 是设计变量 1 随优化历史变化的过程，图 2.32 是设计变量 2 随优化历史变化的过程，图 2.33 是设计变量 3 随优化历史变化的过程，图 2.34 是目标函数随优化历史变化的过程。最后三个设计变量（上、中、下三块板的材料的弹性模量）都趋近于 $1.10E7$ ，目标函数趋近于 0。

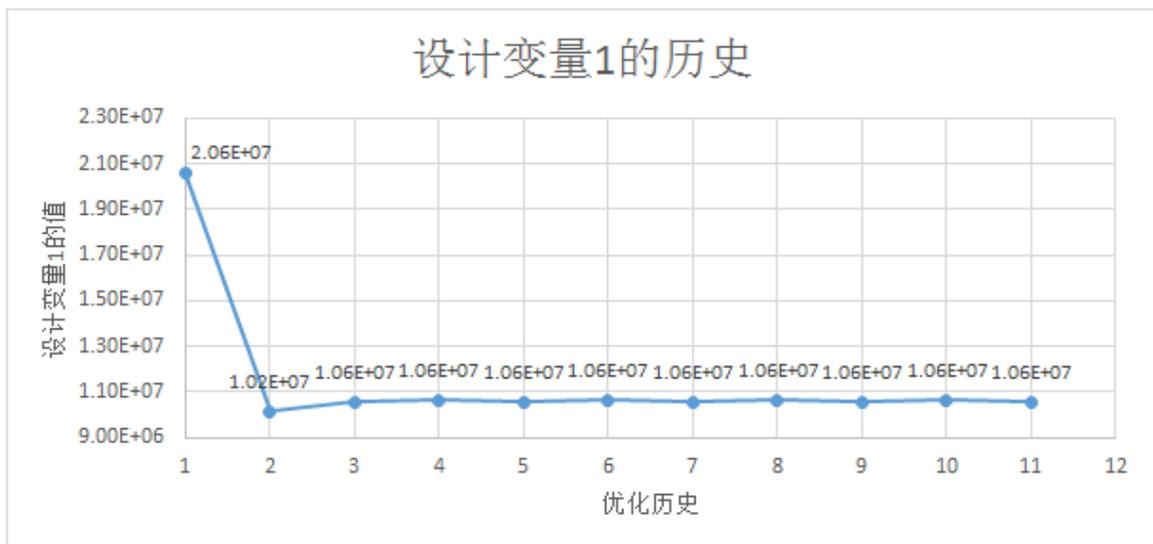


图 2.31 设计变量 1 的优化历史图

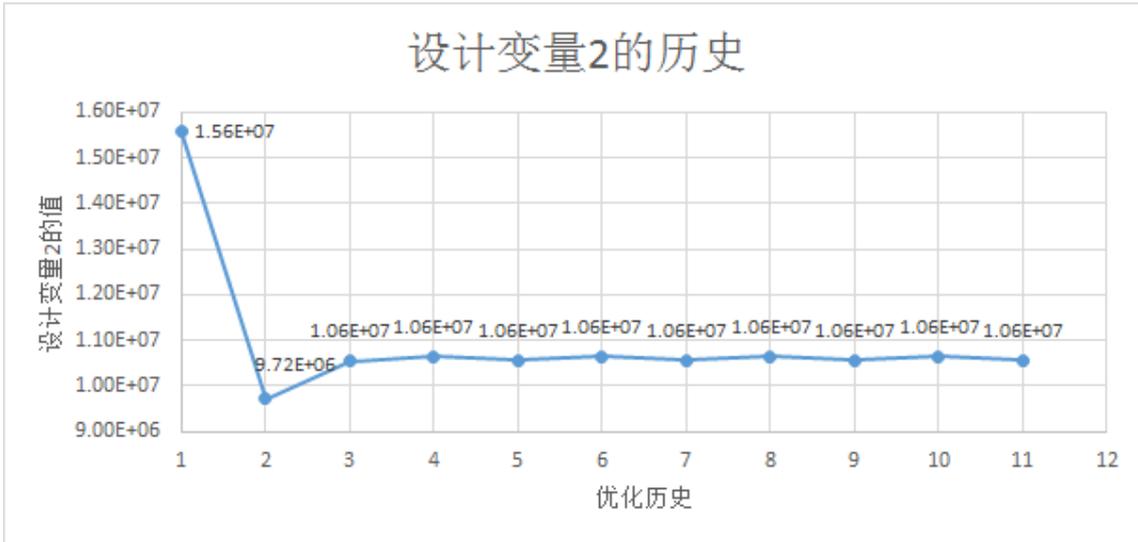


图 2.32 设计变量 2 的优化历史图

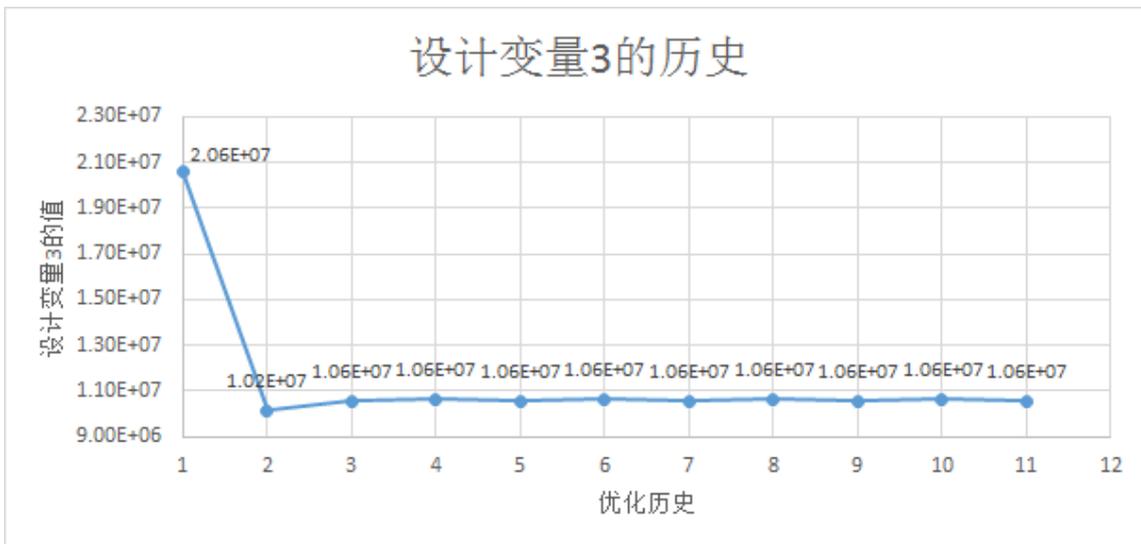


图 2.33 设计变量 3 的优化历史图

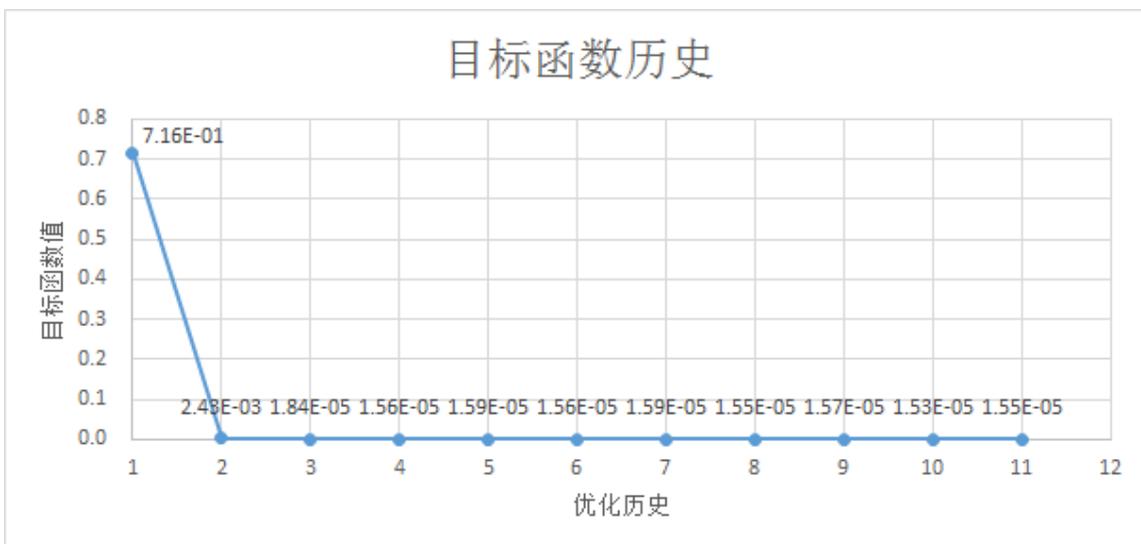


图 2.34 目标函数优化历史图

3 基于复模态的螺栓板结构模型修正

SiPESC 平台集成了模型修正的功能，既可以基于模态差异，根据试验得到的模态数据对有限元模型进行修正，也可以基于频响曲线的差异，根据试验得到的频响曲线对有限元模型进行修正，以期获得合理的有限元模型参数，使得有限元模型的模态或频响曲线与试验所得的模态或频响曲线具有良好的一致性，即使得有限元模型更接近于结构或构件的真实情况。

3.1 目的

该算例针对某螺栓板结构，考虑阻尼的影响，基于复模态对其进行有限元模型修正，修正结果显示，修正后的有限元模型的模态与试验模态高度一致，验证了 SiPESC 平台基于复模态的模型修正功能的正确性。并且，使用户熟悉基于复模态对有限元模型进行修正的操作过程。

3.2 准备

包含模型修正相关插件的 SiPESC 平台。

插件依赖：有限元分析、后处理、优化相关插件。

3.3 所需文件

试验模型文件：complex2.unv；

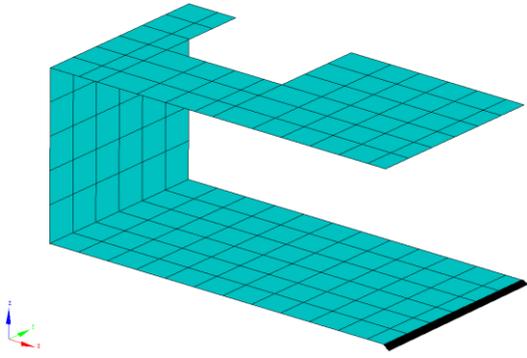
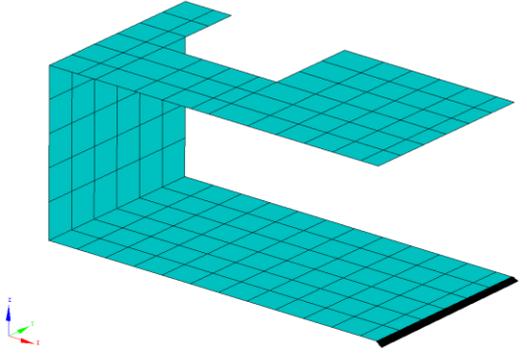
仿真模型文件：complex2-2.bdf

试验模型文件和仿真模型文件放在“**基于复模态的螺栓板结构模型修正**”文件夹内，用户可以将上述文件复制到**项目文件夹**（与项目名称相同）内使用。

3.4 操作流程

(1) 模型修正问题描述。这是一个复模态模型修正问题，问题描述如表 3.1 所示。

表 3.1 基于复模态的螺栓板结构模型修正问题描述

分析类型	复模态的模型修正
目的	考核基于复模态的螺栓板结构几何属性修正
文件名	目录：~\复模态的螺栓板结构模型修正\ 试验模型文件：complex2.unv； 仿真模型文件：complex2-2.bdf
试验模型	
试验模型参数	四节点壳单元；壳单元材料弹性模量 $1.06E7$ ，泊松比 0.33； 壳单元厚度 1；边界条件：右下端固定；
仿真模型	
仿真模型参数	四节点壳单元；壳单元材料弹性模量 $1.06E7$ ，泊松比 0.33； 壳单元厚度：上下板 1，中间竖板 0.5；边界条件：右下端固定；
修正变量	中间竖板壳单元厚度

(2) SiPESC 平台界面调整。首先需要调出 SiPESC 平台的模型修正功能的快捷按钮。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，弹出自定义视角的界面，如图 3.1 所示。点击上部菜单栏的“快捷数据”，在界面左侧“子菜单”的下拉菜单选择“新建”，在下面的选择区域勾选“协同仿真系统”，然后点击右下角的“确定”，自定义视角界面关闭，完成操作。

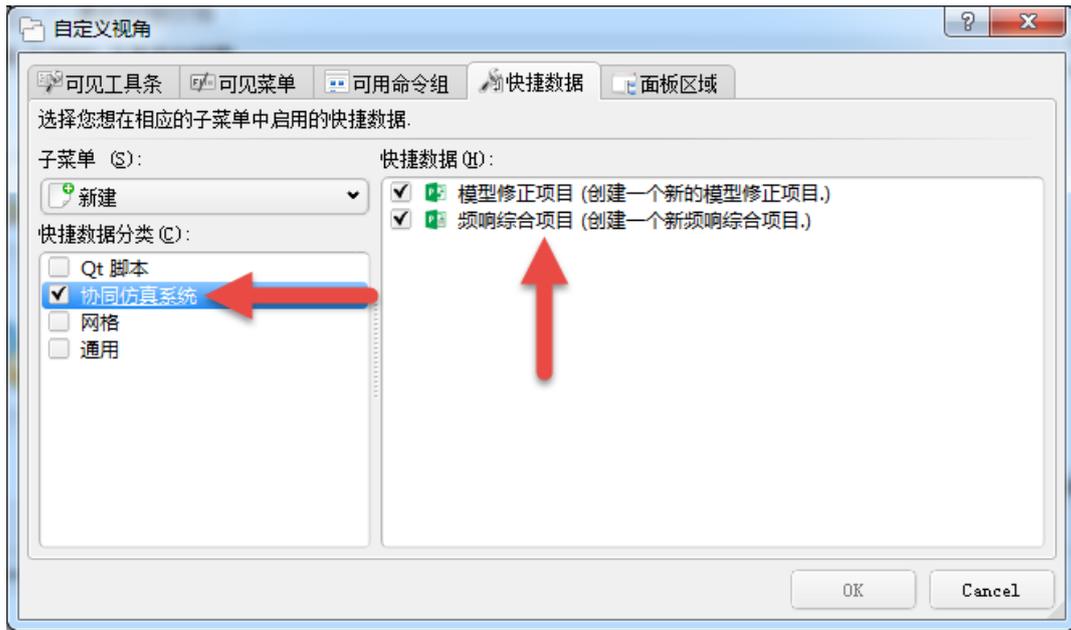


图 3.1 自定义视角界面

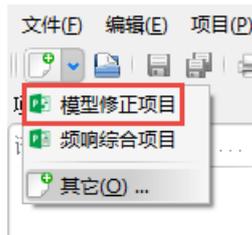


图 3.2 模型修正快捷选项

点击菜单栏“文件 (F)”下方的“新建”，或者直接点击工具栏的新建按钮，即可看到“模型修正项目”选项，如图 3.2 所示。以后便可以通过这个快捷选项来创建模型修正的工程。

为了查看模型修正过程中的变量、目标函数以及约束的变化，还需要调出“优化历史”界面。点击菜单栏“窗口→自定义视角→快捷数据→左侧子菜单→下拉菜单显示视图→勾选模型修正→确定”，自定义视角界面关闭。点击“窗口→显示视图→优化历史”，在 SiPESC 平台界面的右下角就出现了“优化历史”界面，可以左键点击“优化历史”界面的标题栏不松，拖动该界面的位置，和旁边的“问题”界面重合，再通过界面下方的按钮来回切换。

(3) 新建模型修正工程 complex_modal。点击工具栏“新建”旁边的下拉箭头，再点击“模型修正项目”，弹出新建工程对话框，如图 3.3 所示。(注意：工程名的命名不能含有大写字母，否则 SiPESC 平台无法计算)



图 3.3 新建工程对话框

点击“位置”文本框右侧的文件按钮，弹出路径选择对话框，如图 3.4 所示，找到工作路径“sipesworkmu”，点击右下角“确定”按钮，返回新建工程对话框，如图 3.5 所示，点击右下角“确定”按钮，完成新工程 **complex_modal** 的创建。

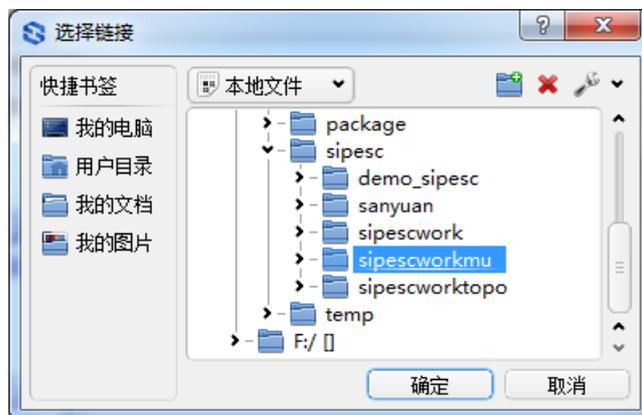


图 3.4 新建工程路径选择对话框



图 3.5 完成新工程的创建

在 SiPESC 平台主界面的左侧“项目浏览器”下可以看到新建的“**complex_modal**”，点击名称左侧的三角箭头，展开下拉菜单，如图 3.6 所示。



图 3.6 项目浏览器中查看 **complex_modal**

(4) 导入有限元模型和试验模型。

① 添加有限元模型文件。如图 3.7 所示，右键点击“**2 数值模型**”，在展开的下拉菜单中点击“**添加仿真模型**”，弹出对话框如图 3.8 所示，选中项目文件夹下的“**complex2-2.bdf**”文件，点击右下角的“**打开**”，完成有限元模型文件的添加。

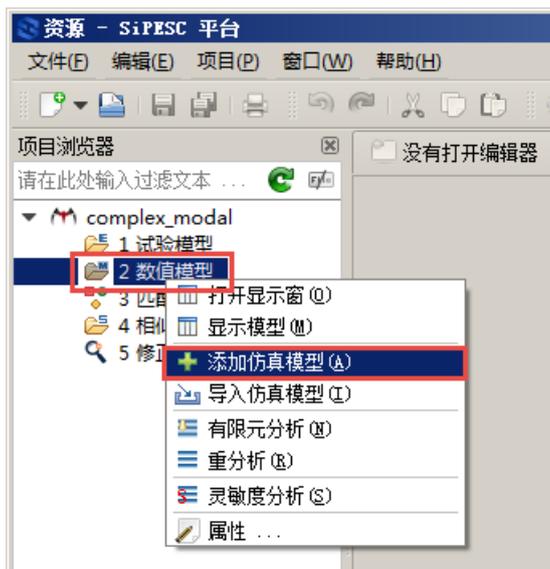


图 3.7 添加有限元模型文件

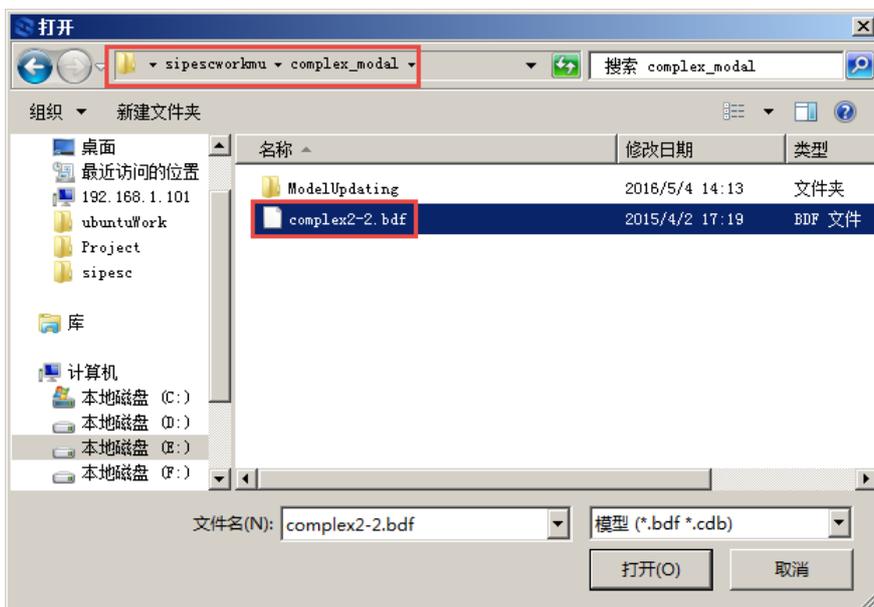


图 3.8 选择有限元模型文件

② 导入有限元模型。右键点击“2 数值模型”，选择“打开显示窗”，打开网格显示器；然后右键点击“2 数值模型→导入仿真模型”，弹窗提示“有限元模型导入结束”，点击“确定”，完成有限元模型的导入。在网格显示器中可以看到有限元模型，左键点击网格显示器区域，按下左键不松，移动鼠标，即可转动视角；将光标移动到网格显示器区域，滚动滚轮，即可实现视图的放大或缩小；同时按下鼠标左键和 shift 键，移动鼠标，可以平移模型，查看有限元模型，如图 3.9 所示。

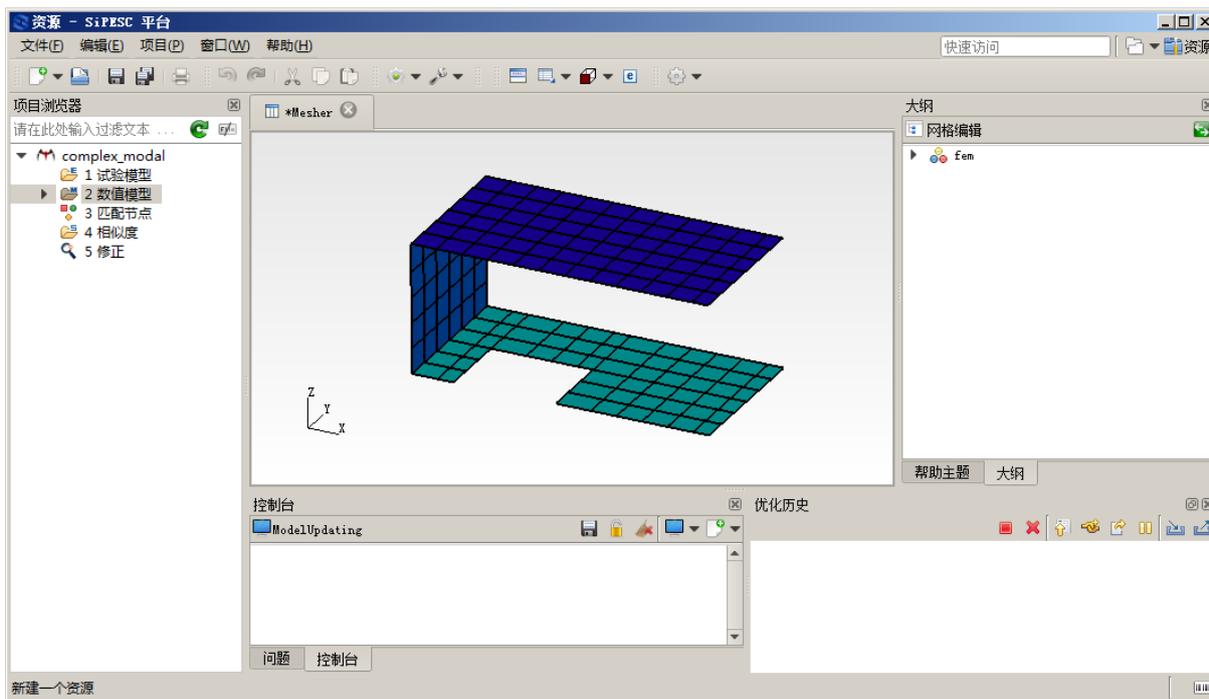


图 3.9 complex_modal 工程的有限元模型

③ 添加试验模型。右键点击“1 试验模型”，选择“添加试验模型”，弹出对话框，选择项目文件夹下的“complex2.unv”文件，点击右下角的“打开”，完成试验模型文件的添加。

④ 导入试验模型。右键点击“1 试验模型”，选择“导入试验模型”，弹窗提示“试验模型导入完成”，点击“确定”，完成试验模型的导入。

⑤ 分析有限元模型。右键点击“2 数值模型”，选择“有限元分析”，几秒钟之后，弹窗提示“有限元分析结束”，点击“确定”，有限元模型计算完毕。

(5) 有限元模型与试验模型的匹配。

① 模型匹配设置。右键点击“3 匹配节点”，选择“设置基本参数”，弹出对话框，如图 3.10 所示。选择“模态分析→模态直接法→MAC”，点击“确定”，完成设置。



图 3.10 模型匹配设置

② 节点匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配节点”，弹窗提示“节点匹配完成”，点击“确定”，完成节点匹配。

③ 模态匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配模态”，弹出模态匹配对话框，如图 3.11 所示。这是有限元模型分析得到的 10 阶模态（可以调整对话框的大小，使 10 阶模态同时显示出来，或者滑动对话框右侧的滚动条来查看其它阶模态），选中全部 10 阶仿真模态（选中之后，对应的模态数据区域变为蓝色，如图 3.11 所示），点击右下角的“下一步”，弹出对话框如图 3.12 所示，这是

试验得到的 10 阶模态，由图 3.11 和图 3.12 可以看出，仿真模态与试验模态在每一阶都有一定的差距。

阶数	频率
1	58.7331
2	96.0941
3	123.214
4	310.338
5	326.388
6	703.732
7	1029.84
8	1134.58
9	1456.73
10	1928.41

图 3.11 仿真结果的模态选择

阶数	频率
1	98.95
2	124.54
3	143.32
4	349.162
5	394.278
6	646.662
7	996.458
8	1191.33
9	1554.76
10	1914.27

图 3.12 试验结果的模态选择

仿真阶数	试验阶数
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7

图 3.13 模态匹配

选中全部 10 阶试验模态，点击“下一步”，弹出对话框如图 3.13 所示。（注意：点击图 3.12 所示对话框的“上一步”按钮，可以回到上一步，例如从试验结果对话框返回到仿真结果对话框）

图 3.13 显示仿真模态与试验模态的匹配关系，可以选中某一阶或几阶试验模态的阶数，点击对话框右上角的“上移”或“下移”，改变不同阶试验模态的先后顺序，来调整仿真模态与试验模态的匹配关系。这里不需要调整，点击右下角的“完成”，关闭对话框，完成仿真模态与试验模态的匹配。

④ 自由度匹配。右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配自由度/频响曲线”，弹出对话框，如图

3.14 所示。可以点击某一个节点的某一自由度对应的绿色对勾，使之变为红色带杠圆圈，表示不匹配该自由度；反之点击某一个节点的某一自由度对应的红色带杠圆圈，使之变为绿色对勾，表示匹配该自由度。

点击 GEO ID 下面的 All，使灰色小球变成绿色对勾，能够匹配全部自由度，再点击一下，使绿色对勾变成红色带杠圆圈，取消匹配全部自由度；All 后面的一行，每一个灰色小球对应下面一列的全部自由度，而 All 下面的一列，每一个灰色小球对应后面一行的全部 6 个自由度，可以根据需要选择要匹配的自由度。这里不需要调整，直接点击“确定”，关闭对话框，完成自由度匹配。

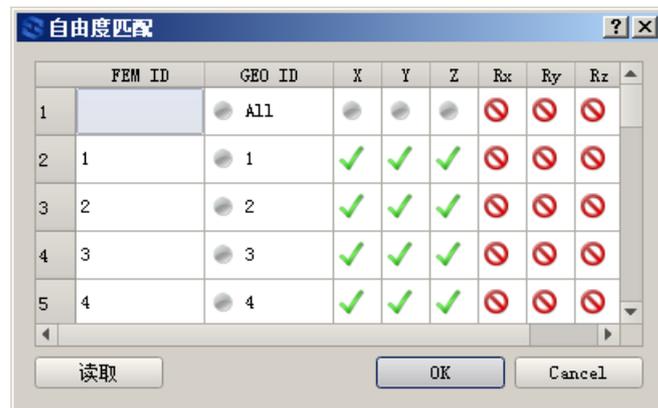


图 3.14 自由度匹配

(6) 相似度分析。

① 相似度分析。右键点击“4 相似度”，选择“计算相似度”，弹窗提示“相似度计算完成”，完成相似度分析。

② 相似度查看。右键点击“4 相似度”，选择“查看相似度”，弹出窗口如图 3.15 所示。点击右上角的“类型”下拉菜单，选择“MAC”，点击“历史”的下拉菜单选择“MAC”，这是 10 阶试验模态与仿真模态的 MAC 图，横坐标是 10 阶试验模态，纵坐标是 10 阶仿真模态。

注意：若是在优化之后，“历史”的下拉菜单可以选择查看每一步优化的“MAC*”，“*”是数字 1、2、3、4...表示优化步；这里还没有进行优化，所以就只有一个“MAC”。

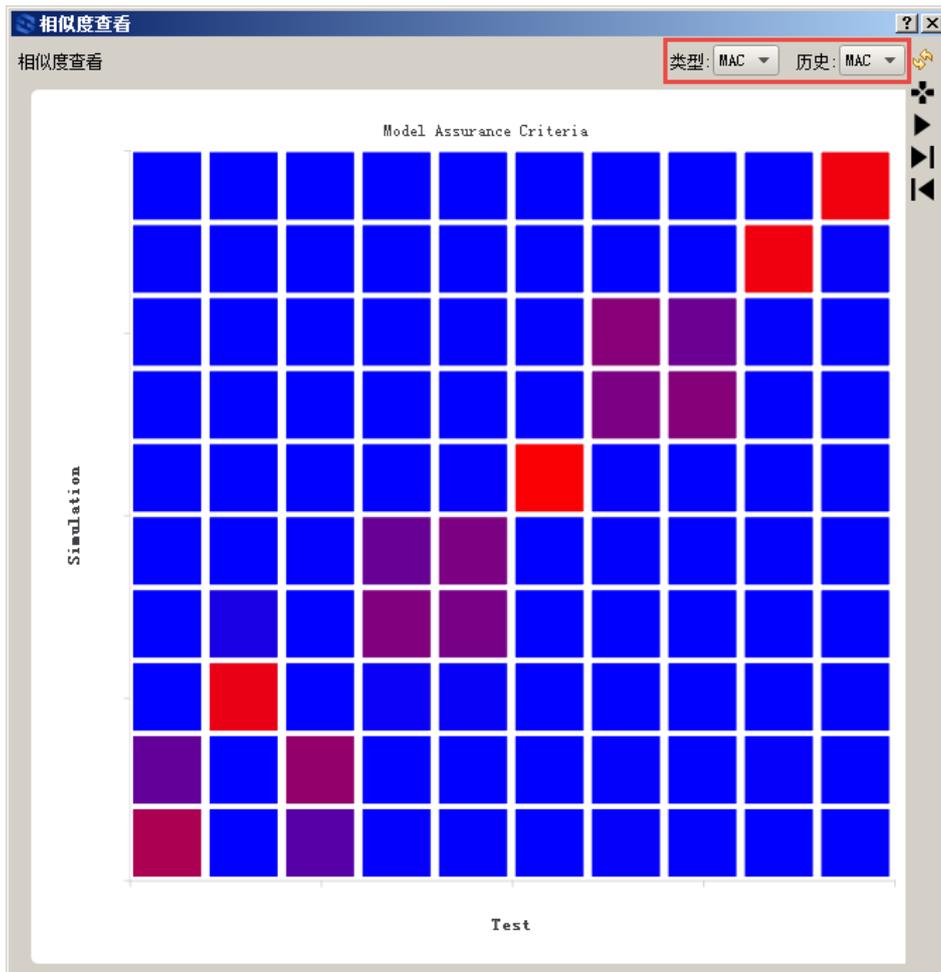


图 3.15 修正前的 MAC 图

(7) 模型修正。

① 建立优化模型。右键点击“5 修正”，选择“配置优化模型”，弹出窗口如图 3.16 所示。在建立优化模型的对话框上，要选择设计变量、目标函数、约束函数和优化算法。

点击设计变量窗口右侧的“添加”按钮，弹出对话框如图 3.17 所示，选择“PROP-2 0.5 截面积”（表示中间竖向板壳单元的厚度），点击“确定”，完成设计变量的选择。

在目标函数窗口，选择“MACMEAN”。

点击约束函数窗口右侧的“添加”按钮，弹出对话框如图 3.18 所示，选择“MAC 1 ...”往下直到“MAC 10 ...”，表示选择全部 10 个 MAC 值作为优化的约束函数，点击“确定”，完成约束函数的选择。

在算法类型窗口，选择“MMA”，并且在对话框的左下角，点选“数值法”，表示采用数值法求解。至此，完成优化模型的建立，如图 3.19 所示，点击右下角“确定”，关闭对话框。

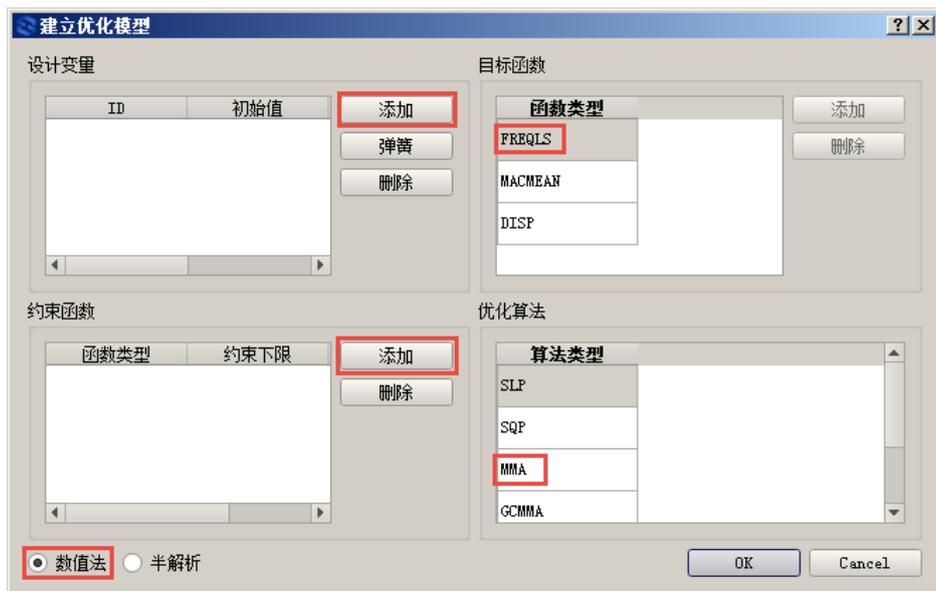


图 3.16 建立优化模型

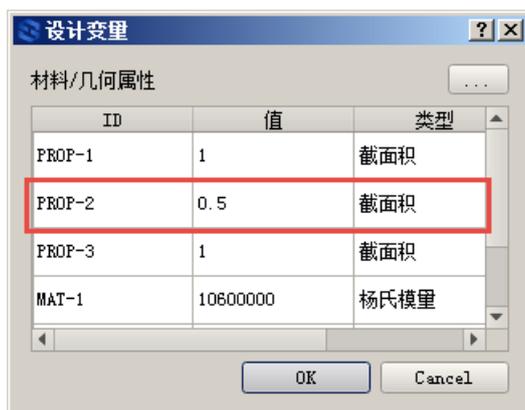


图 3.17 选择设计变量



图 3.18 选择约束函数

注意，添加完设计变量之后，滑动设计变量窗口下方的滚动条，可以查看设计变量的“最小值”和“最大值”。双击“最小值”或“最大值”对应的数值，进入文本框，可以修改数值。同样，约束

函数的“约束下限”和“约束上限”也可以修改。该算例对设计变量和约束函数的上下限都不进行修改。



图 3.19 建好的优化模型

② 模型修正。建立好优化模型之后，开始优化，对模型进行修正。右键点击“5 修正”，选择“优化”，修正优化开始，经过一段时间后，弹窗提示“模型修正完成”，优化完成。

③ 查看优化结果。在优化过程中，优化历史界面会显示每一步优化的信息，如图 3.20 所示。最左边的“1”表示第一步优化，往右依次是该步设计变量值、目标函数值、约束函数值等。

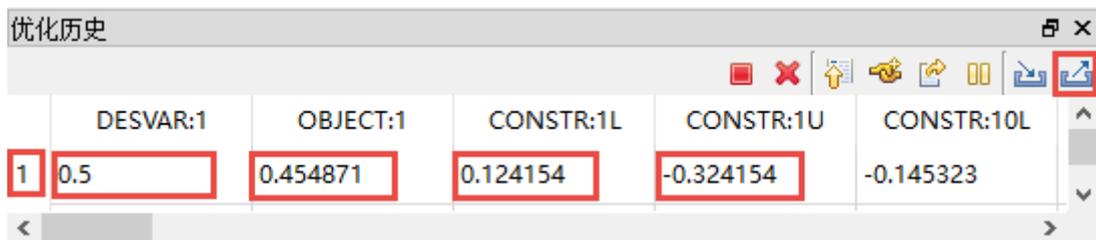


图 3.20 优化历史界面

可以将整个优化过程中，每一步的设计变量、目标函数、约束函数的取值导出来，点击优化历史界面菜单栏最右边的斜向上的箭头，弹出对话框如图 3.21 所示。“文件名”文本框输入“complex_modal_result”，保存位置选择“E:\sipesc\sipescworkmu\complex_modal”，点击右下角“保存”。该结果文件可以用 Excel 打开，可以进一步利用 Excel 绘制设计变量随优化步变化的过程图和目标函数随优化步变化的过程图，如图 3.25 和图 3.26 所示。

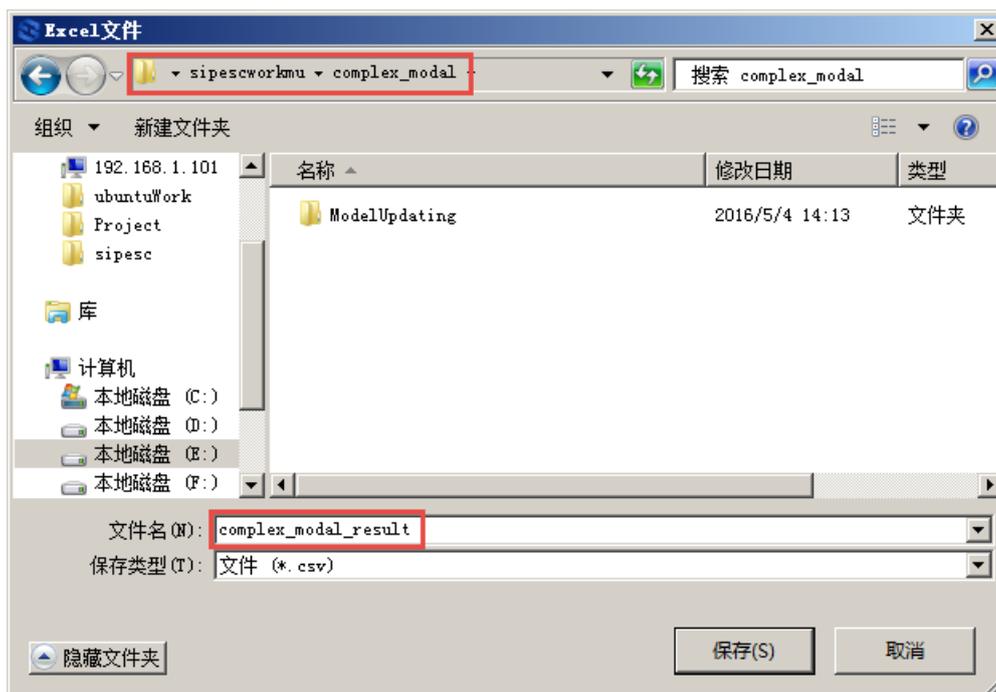


图 3.21 导出优化记录文件

优化完成后，再右键点击“4 相似度”，选择“查看相似度”，弹出窗口如图 3.22 所示，点击右上角的“类型”下拉菜单，选择“MAC”，点击“历史”的下拉菜单选择“MAC”，显示修正后 10 阶仿真模态与试验模态的 MAC 图。由图 3.22 可知，修正之后仿真模态与试验模态的相似度很高。另外，可以点击“历史”的下拉菜单，选择“MAC*”，查看某一步优化之后的 MAC 图。

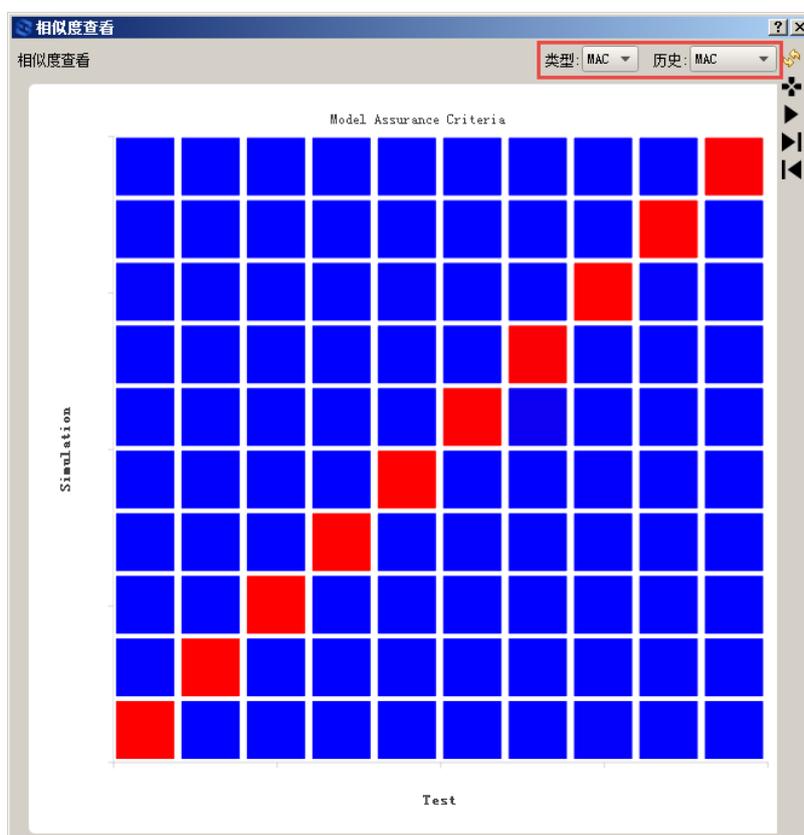


图 3.22 修正之后的 MAC 图

右键点击“3 匹配节点”，选择“匹配模态”，弹出窗口如图 3.23 所示。这是修正之后的仿真模态，与图 3.24 所示的各阶试验模态相对比，每一阶仿真模态都很接近相应的试验模态，二者之间的差距比修正之前小了很多。（修正之前，见图 3.11 和图 3.12）

阶数	频率
1	99.4692
2	126.409
3	153.128
4	372.837
5	404.687
6	701.359
7	1041.18
8	1232.01
9	1636.21
10	1979.17

图 3.23 修正之后的仿真模态

阶数	频率
1	98.95
2	124.54
3	143.32
4	349.162
5	394.278
6	646.662
7	996.458
8	1191.33
9	1554.76
10	1914.27

图 3.24 试验模态

图 3.25 是设计变量随优化历史变化的过程，图 3.26 是目标函数随优化历史变化的过程。最后设计变量（中间竖板的厚度）都趋近于 1，目标函数趋近于 0。

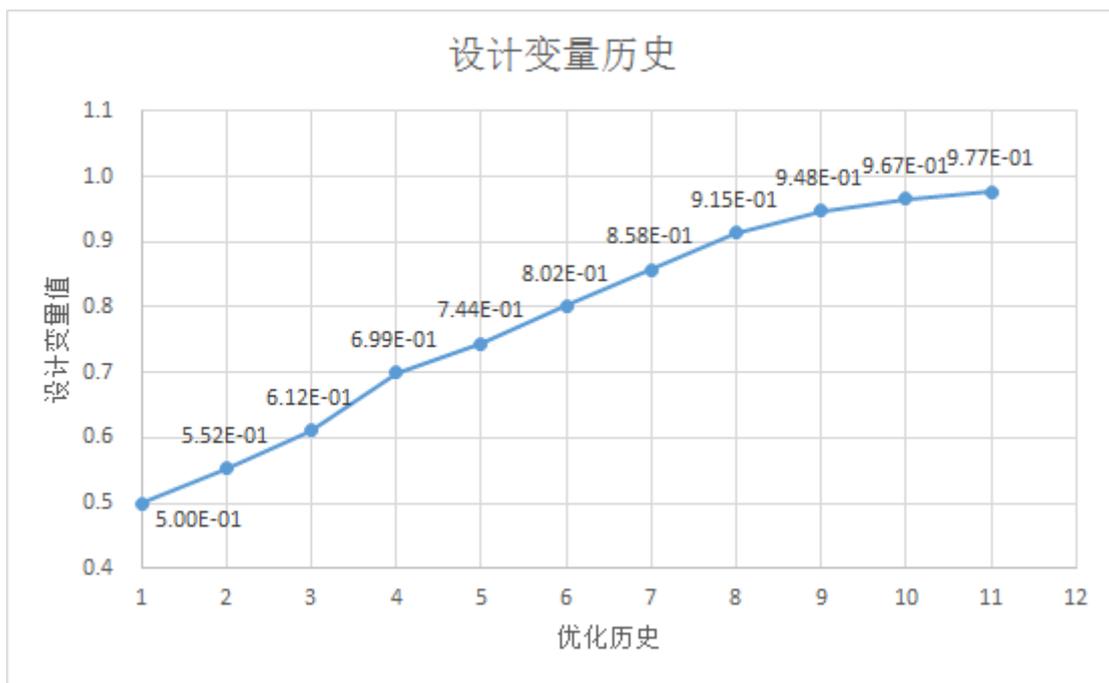


图 3.25 设计变量优化历史图

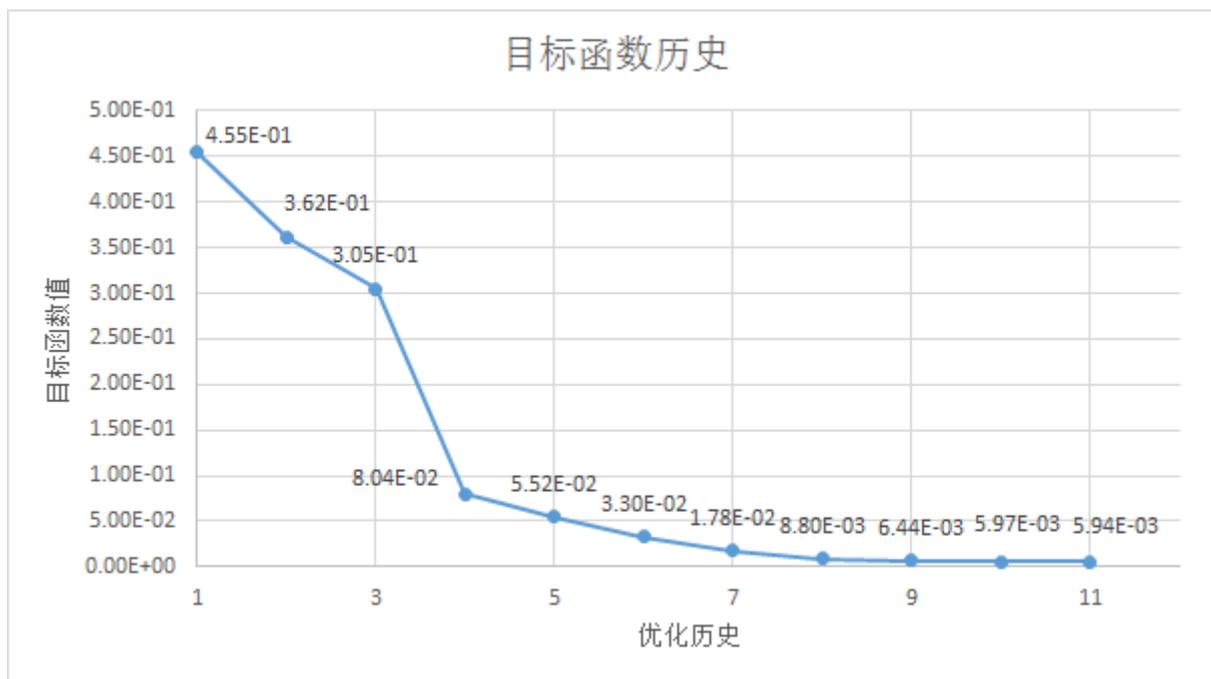


图 3.26 目标函数优化历史图

第二部分 频响综合

4 汽车频响综合算例平台操作流程

SiPESC 平台集成了频响综合的计算方法，既能计算有限元模型之间的综合，也能计算试验模型和有限元模型之间的综合，为了使用户掌握试验模型和有限元模型之间频响综合方法的操作流程，特以汽车模型（源于 LMS）来演示，有限元模型之间综合方法的操作流程在另一以风电塔为算例的文档中演示，请读者自行查阅。

4.1 目的

使用户掌握试验模型和有限元模型之间频响综合方法的操作流程。

4.2 准备

含加速度频响综合插件的 SiPESC 平台。
插件依赖：有限元、后处理相关插件。

4.3 所需文件

各个子结构的 bdf 文件（包含有限元信息）：

- body_wf_3.bdf
- frontcradle.bdf
- rearcradle.bdf

各个子结构的 op2 文件和 unv 文件（包含模态和频响信息）：

- body_frfs.unv
- frontcradle.op2
- rearcradle.op2

各个子结构的 iop 文件（包含各个子结构的激励响应点信息）：

- bodye.iop, bodyr.iop
- frontcradleE.iop, frontcradleE.iop
- rearcradle.iop

所需文件放在“频响综合-汽车”文件夹下。

说明：汽车共分为 3 个子结构：车体、前架和后架，其中车体的加速度频响结果文件使用 unv 文件（试验数据），其他子结构文件使用有限元软件生成，建模的过程和生成各个子结构文件的方法在这里不再详述。需要说明的一点，若用户需要自行建立其他模型计算，为了保证计算精度，各个子结构的模态阶数对应的最大频率应为所计算频率的 3-4 倍。

4.3 操作流程

(1) 配置所需插件

打开 SiPESC 平台，点击菜单栏“窗口→配置”选项，打开“配置”对话框。在对话框左侧列表中，选择“通用→启动与关闭”，打开“启动与关闭配置”页面。点击“全部选择”，点击“确定”结束，如图 4.1 所示。（对于有一定基础的用户，可以仅仅选择所需插件加载）

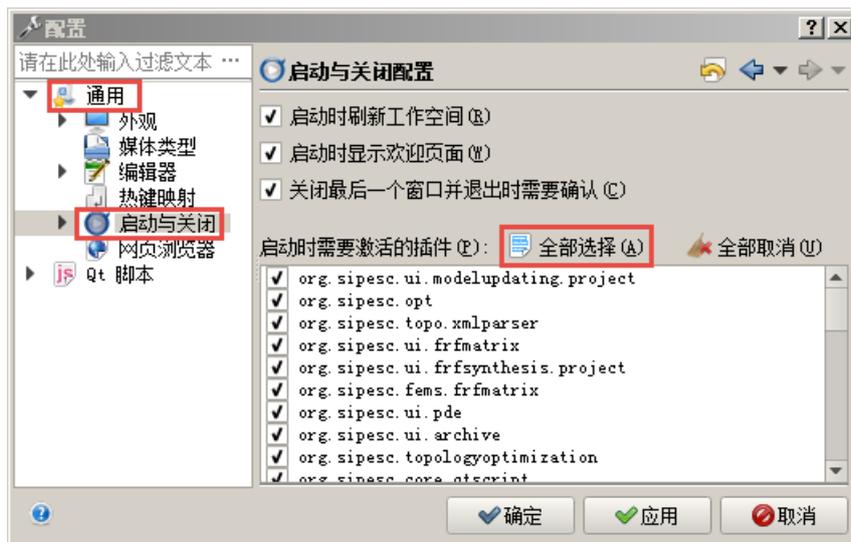


图 4.1 平台插件配置

(2) 配置快捷菜单

为了更方便的使用频响综合功能，我们将此功能添加到“新建”快捷列表中。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，打开“自定义视角”对话框。如图 4.2 所示，在对话框中点击“快捷数据”选项卡，左侧“子菜单”下选中“新建”，下面“快捷数据分类”中选中“协同仿真系统”，右侧“快捷数据”列出的两个选项中选中“频响综合项目”，并点击“确定”关闭窗口。



图 4.2 添加频响综合快捷方式

(3) 新建项目

点击菜单栏“文件→新建→频响综合项目”，或者点击工具栏新建按钮旁的黑色三角按钮，如图 4.3 所示。打开“新建频响综合项目”对话框，在话框依次输入文件的名称和工作目录，并点击“完成”结束，如图 4.4 所示。

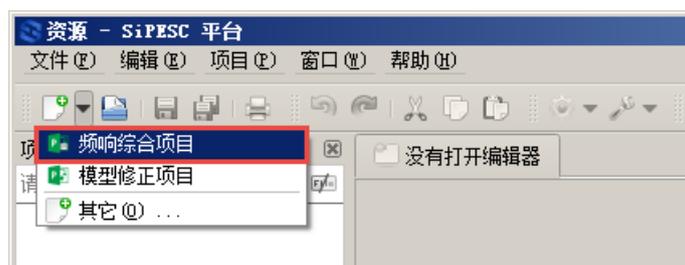


图 4.3 新建频响综合工程

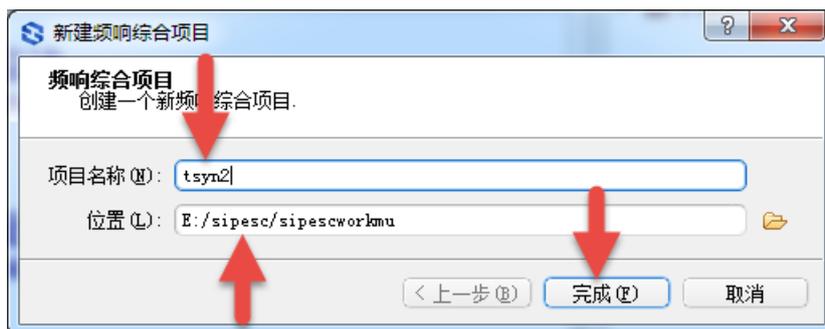


图 4.4 新建频响综合项目

此时，平台左侧的“项目浏览器”中将会出现刚刚创建的项目，如图 4.5 所示。



图 4.5 项目浏览器中新建的工程

(4) 添加车身试验数据文件（unv 文件）

如图 4.6，右键点击“模型”，弹出右键菜单中选择“添加模型”，打开“打开文件”对话框。选择在项目文件夹内已经准备好的试验数据文件“body_frfs.unv”，点击“打开”结束，如图 4.7。

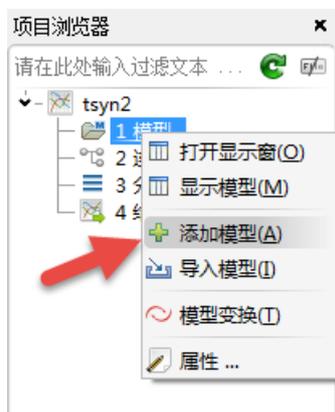


图 4.6 添加模型

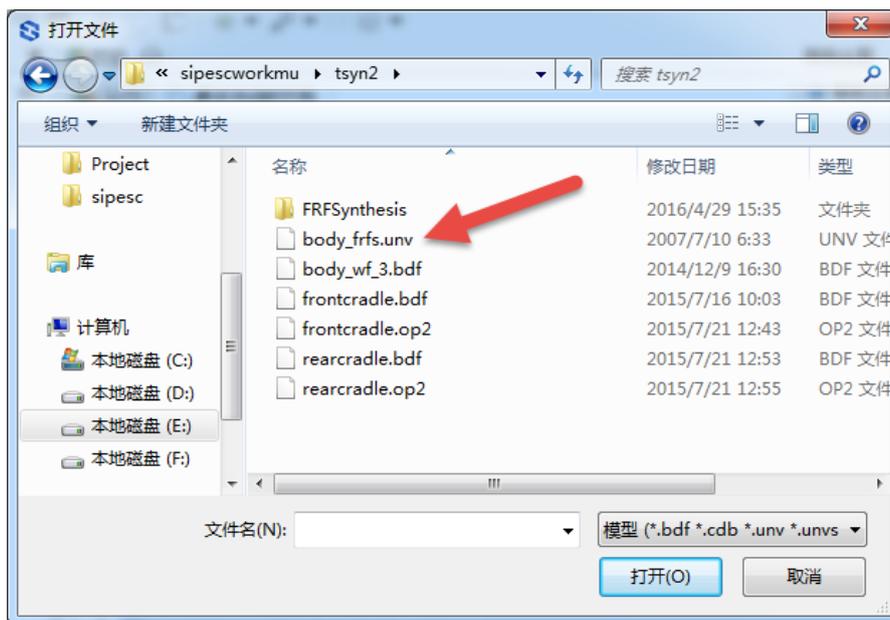


图 4.7 选择试验结果文件

(5) 添加车身网格文件 (bdf 格式)

如图 4.8，右键点击“SubE_1”，弹出右键菜单中选择“选择网格文件”，打开“打开文件”对话框。选择项目文件夹下已经准备好的文件“body_wf_3.bdf”，并点击“打开”结束，如图 4.9。此时，车体子结构所需文件已全部添加。



图 4.8 添加模型文件

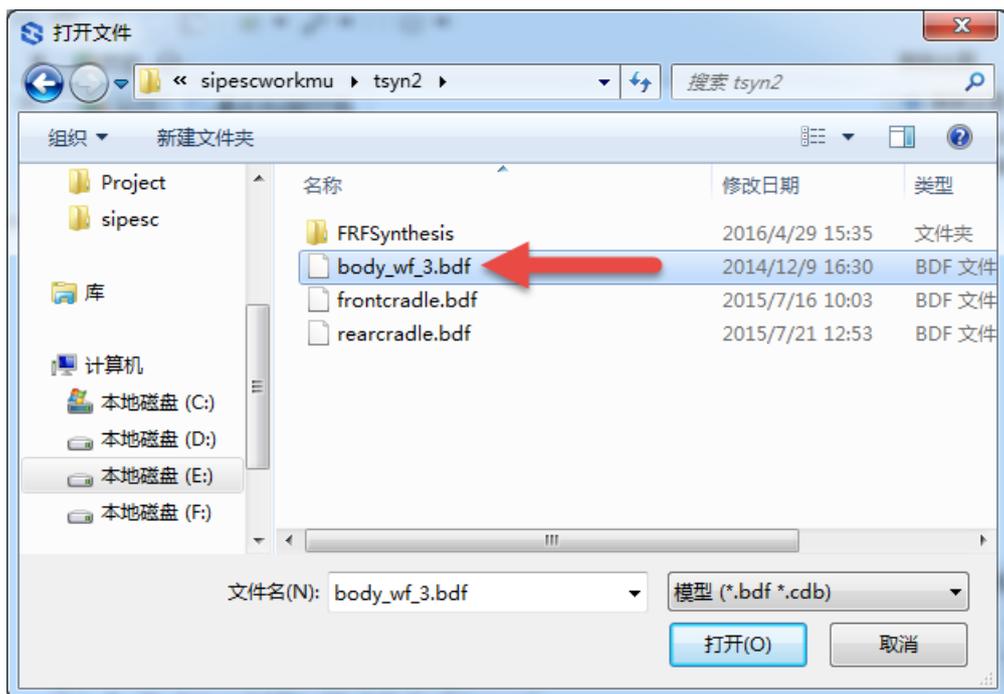


图 4.9 选择模型文件

(6) 按照步骤 (4) 和 (5) 将剩余子结构所需的 op2 文件和 bdf 文件分别导入，注意每个子结构要先选择 op2 文件再选择对应的 bdf 网格文件，全部导入后如图 4.10 所示。

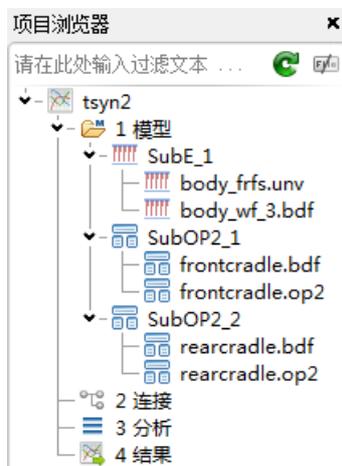


图 4.10 各个子结构相应文件导入后图示

(7) 导入模型

如图 4.11，右键点击“模型”，弹出右键菜单中选择“导入模型”，平台中部编辑区自动新建一个 Mesher 窗口。之后等待模型导入，直至出现模型导入成功窗口，点击“确定”，导入后的模型如图 4.12 所示。

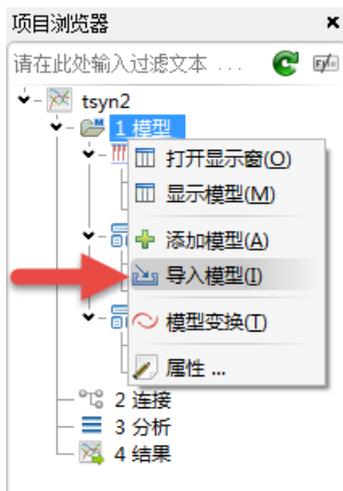


图 4.11 导入模型

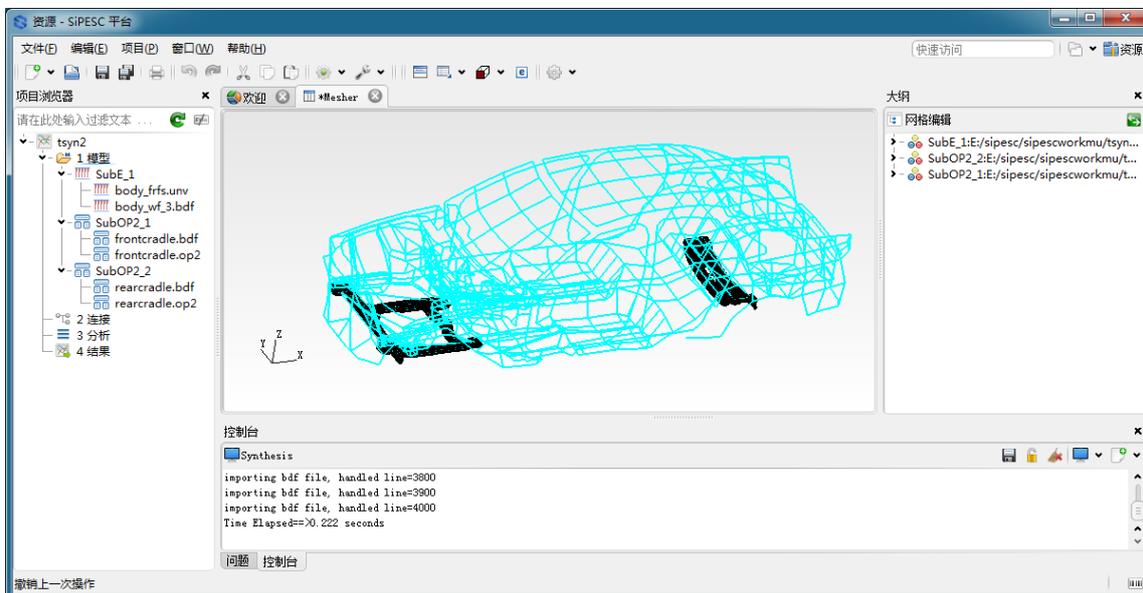


图 4.12 模型导入后图示

(8) 添加激励响应点

如图 4.13，右键点击“SubE_1”，弹出右键菜单中选择“定义激励响应点”，弹出“选择激励响应点”对话框。

切换到“激励点”选项卡，如图 4.14。

点击“导入”，弹出“打开 IO 文件”对话框，选择激励点定义文件“bodye.iop”，如图 4.15。

切换到“响应点”选项卡，如图 4.16。

点击“导入”，弹出“打开 IO 文件”对话框，选择响应点定义文件“bodyr.iop”，如图 4.17。

最后点击“确定”关闭窗口，如图 4.18。

这样车体子结构的激励点和响应点已经定义。按照上述流程分别导入另外两个子结构的激励点和响应点信息即可，其中“frontcradleE.iop”和“frontcradleR.iop”分别为前架子结构的激励点和响应点，后架子结构的激励点和响应点都为“rearcradle.iop”。



图 4.13 定义激励点和响应点



图 4.14 导入激励点

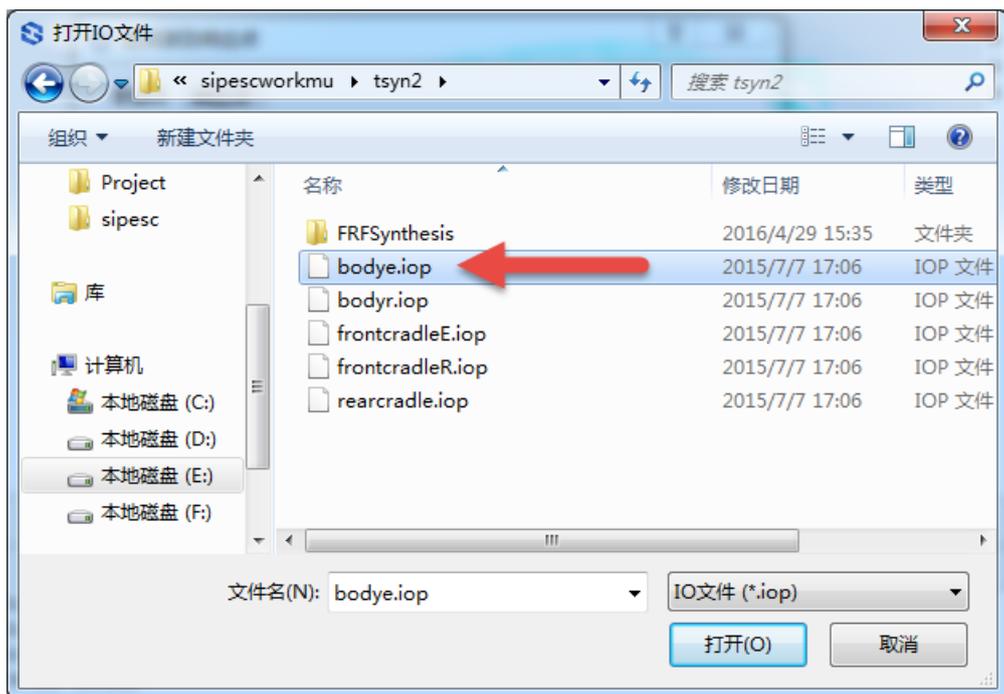


图 4.15 选择相应激励点文件



图 4.16 导入响应点

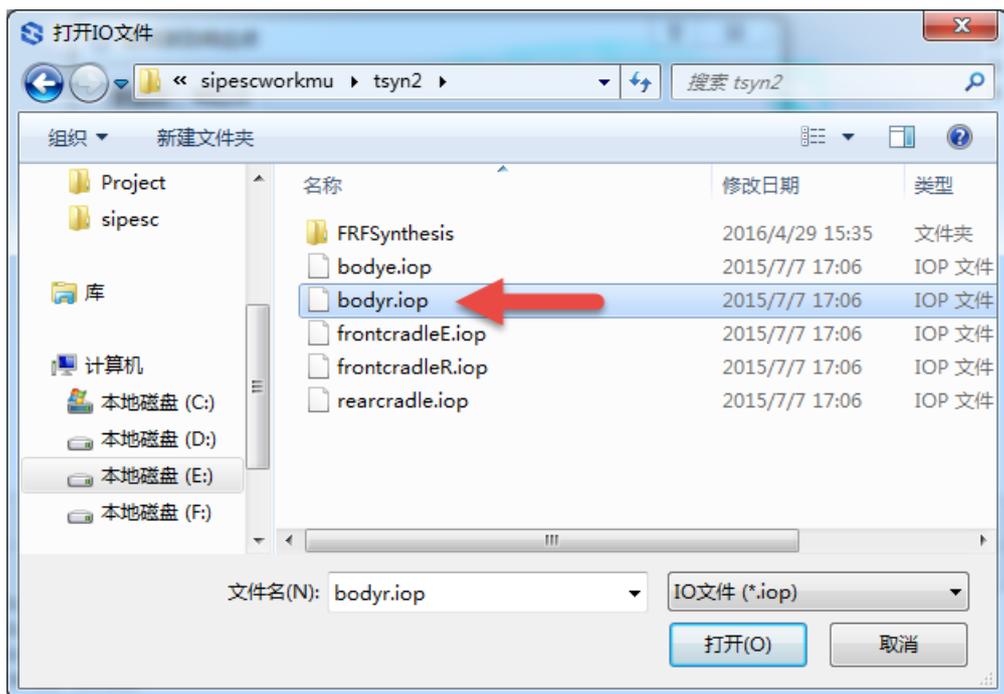


图 4.17 选择相应响应点文件

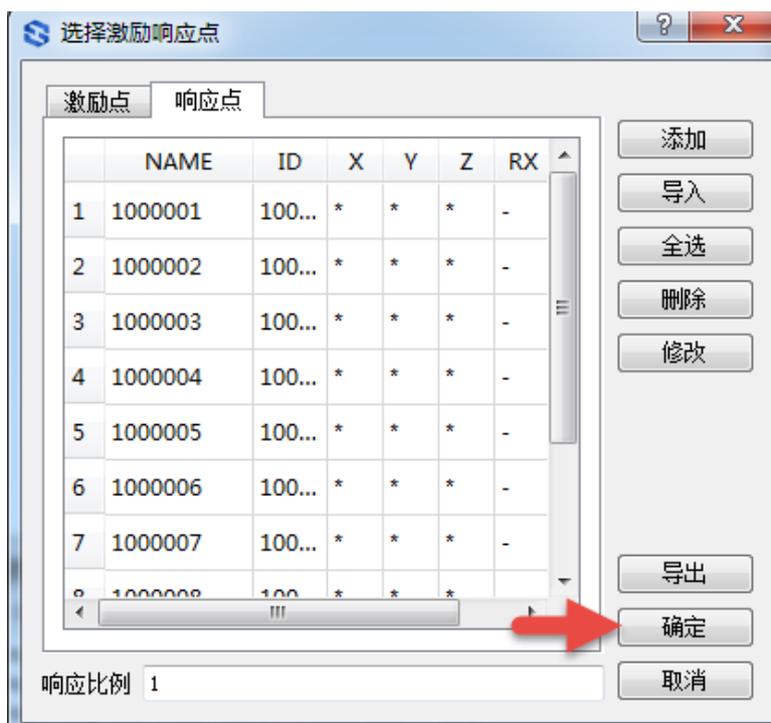


图 4.18 完成激励点和响应点定义

(9) 定义连接点

如图 4.19，右键点击“连接”，弹出右键菜单中选择“添加连接点”，打开“连接集”对话框。如图 4.20，进行如下操作建立连接关系：

- ① 选择刚性连接；
- ② 点击按钮，选择 SubE_1 为主子结构；（图 4.21）
- ③ 点击按钮，选择 SubOP2_1 为从子结构；（图 4.21）
- ④ 勾选三个平动自由度（默认六个均被选择）；

⑤ 点击右上角的“A”（根据容差自动匹配连接点），打开“容差”对话框，设置节点距离容差为0.01，点击“确定”。（图 4.22）

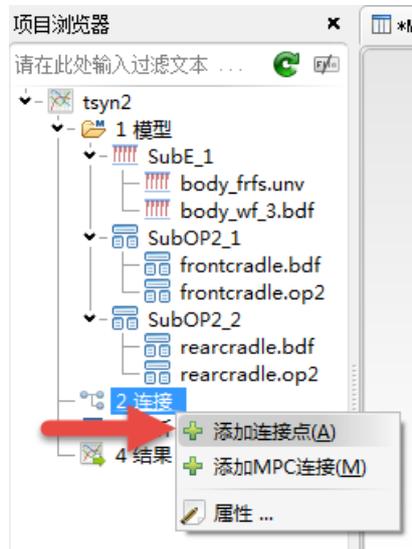


图 4.19 添加连接点

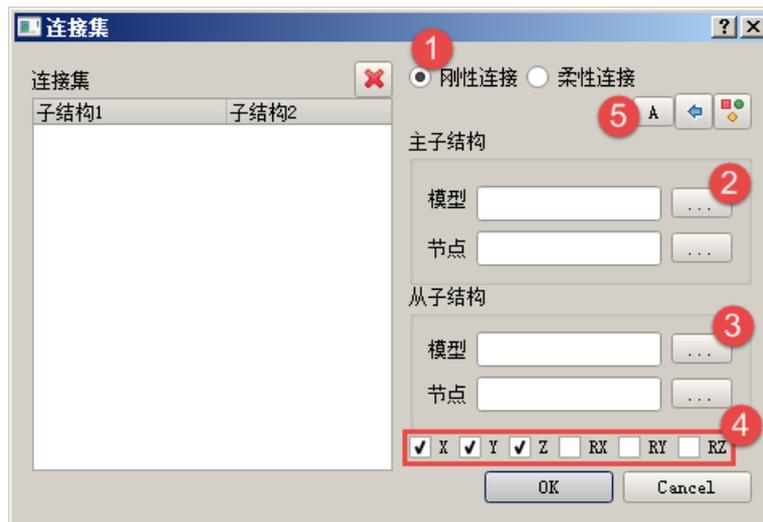


图 4.20 定义连接集

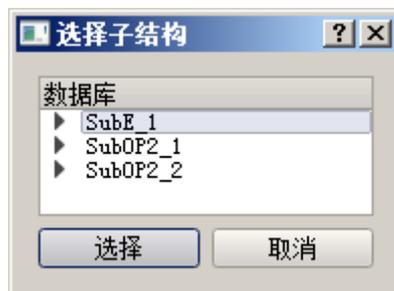


图 4.21 选择相应子结构



图 4.22 设置连接点容差

此时，SubE_1 与 SubOP2_1 之间的连接定义完成，“连接集”对话框左侧可以看到新建立的连接关系，如图 4.23。第一级 SubE_1 表示子结构名称，第二级 1000001 表示连接节点，第三级 123 表示连接自由度。

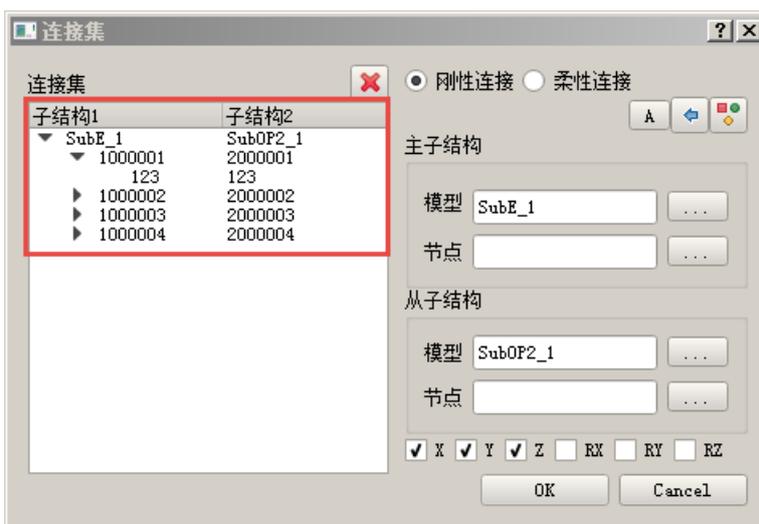


图 4.23 连接集

重复上述操作，添加 SubE_1 与 SubOP2_2 的连接。定义完成后的连接点如图 4.24，点击“确定”完成。

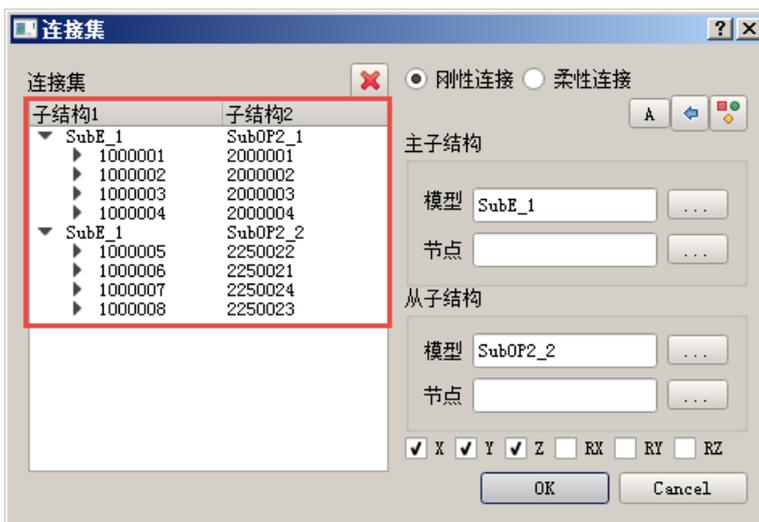


图 4.24 各个子结构连接点添加完成后图示

(10) 设置频率计算区间和步长

如图 4.25，右键点击“分析”，弹出右键菜单中选择“配置求解器”，打开“分析设置”对话框，设置最小频率、频率增量和频率个数，并点“确定”结束，如图 4.26。

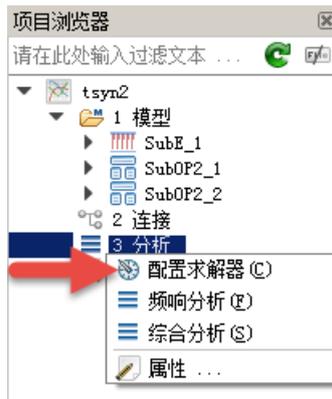


图 4.25 选择求解频率范围及步长

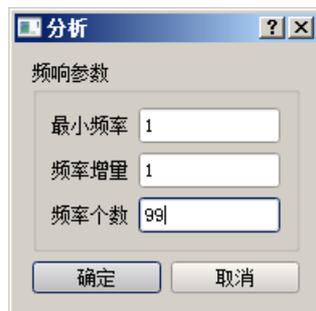


图 4.26 设置频率范围及步长

(11) 计算各个子结构频响

如图 4.27，右键点击“分析”，弹出右键菜单中选择“频响分析”，之后等待，直至弹出计算完成窗口，点击“确定”，如图 4.28。

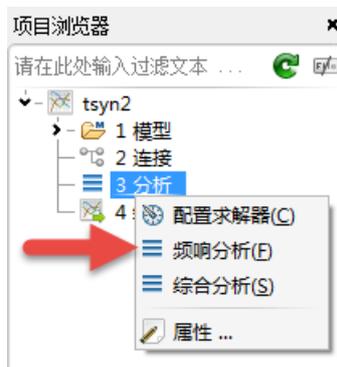


图 4.27 计算各个子结构频响



图 4.28 各个子结构频响计算完成后图示

(12) 频响综合

如图 4.29，右键点击“分析”，弹出右键菜单中选择“综合分析”，之后等待，直至弹出计算完成窗口，点击“确定”，如图 4.30。

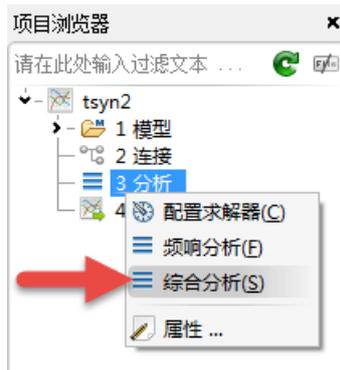


图 4.29 各个子结构频响综合计算



图 4.30 频响综合计算完成后图示

(13) 查看结果

至此，频响综合计算已经完成。如图 4.31，右键点击“结果”，弹出右键菜单中选择“更新结果”。可查看结果将会列于“结果”下，分别为“子结构”和“装配整体”。

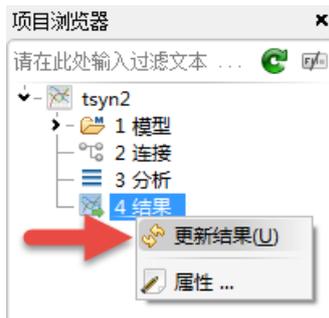


图 4.31 更新计算结果

我们先来查看整体的综合结果，如图 4.32，右键点击“装配整体”，弹出右键菜单中选择“查看结果”，打开“频响函数曲线”对话框。

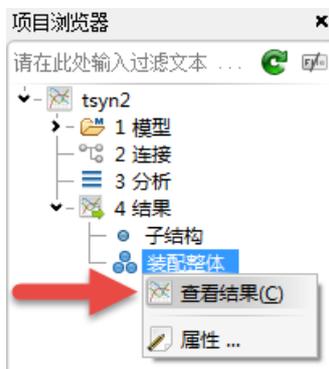


图 4.32 查看综合结果

在“频响函数曲线”对话框中将想要展示的结果信息填入，此题的激励响应点信息见“频响综合-汽车”文件夹下的“连接关系.txt”文件，用户可以参考此文件输入激励响应点得到相应的频响函数。例如激励节点为“前悬架”子结构的 2000020 节点，方向为 z，响应节点为“车体”的 359064 节点，方向为 z，依次将信息填入，选择“实部”，并点“绘图”，所需激励点响应点的位移频响函数就绘制出来了，如图 4.33。我们还可以将结果导出，点击“导出”，弹出的选项卡选择导出文件夹，填入文件名，点“保存”即可，如图 4.34，结果将会以表格的形式保存。

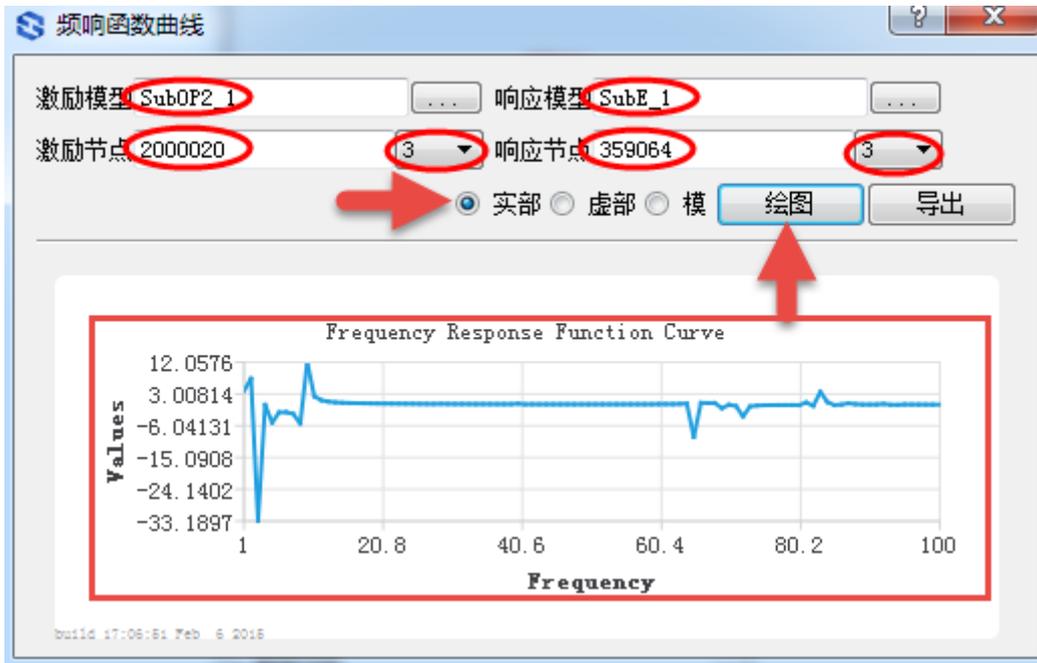


图 4.33 设置 SubOP2_1 子结构查看数据及结果图示

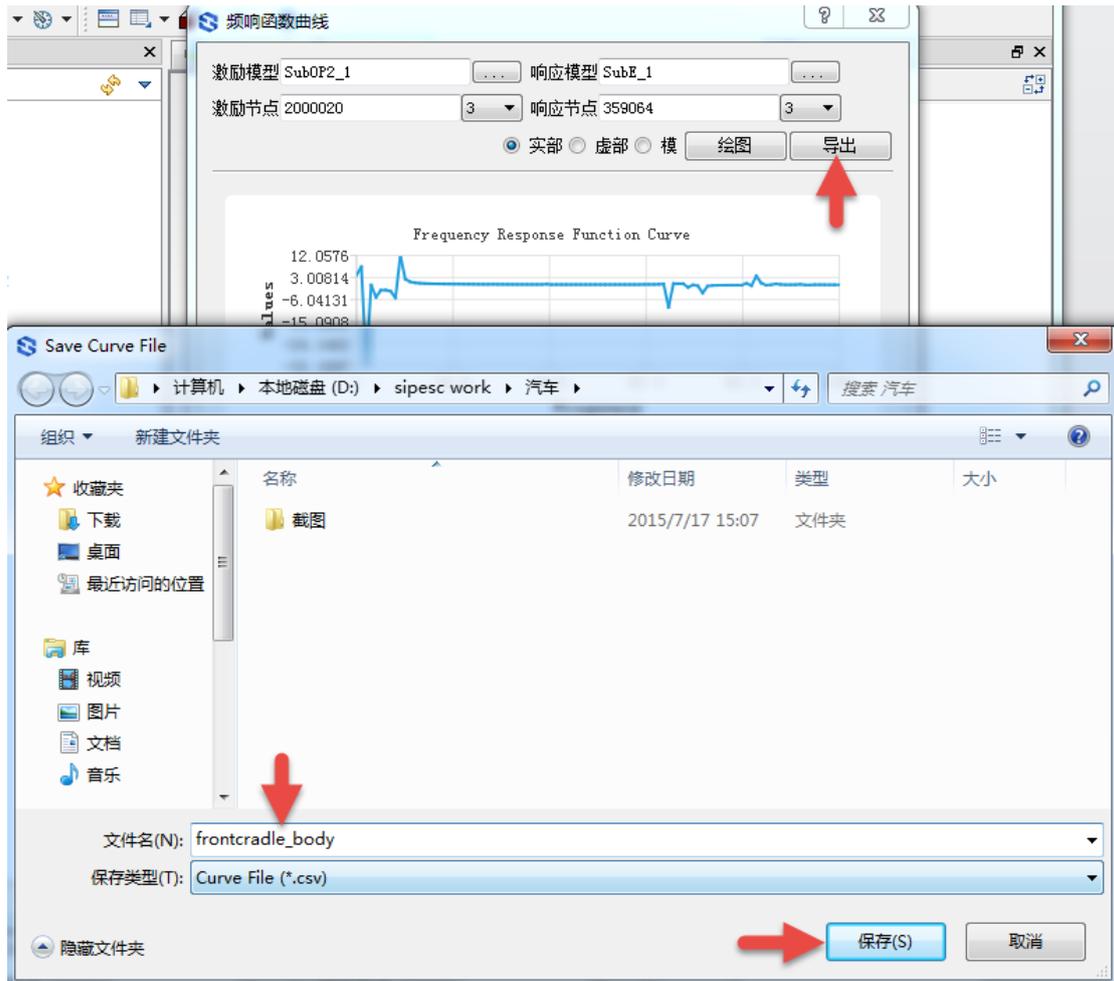


图 4.34 导出结果

接着可以查看子结构参加综合之前的频响和综合之后的频响，如图 4.35，右键点击“子结构”，弹出右键菜单中选择“查看结果”，打开“频响函数曲线”对话框。

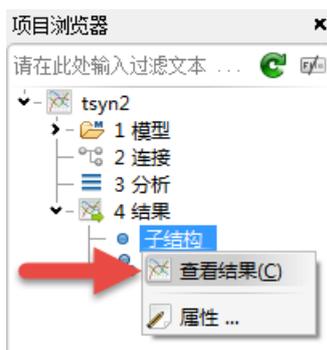


图 4.35 查看子结构综合前和综合后频响

在“频响函数曲线”对话框填好所需子结构和激励响应信息，然后点击“绘图”，弹出的选项卡可以查看综合之前的频响(Original)或综合之后的频响(Synthesis)，如图 4.36。图 4.37 和图 4.38 分别为综合之前的频响(Original)和综合之后的频响(Synthesis)，当然我们也可以导出结果，方法如前所述。

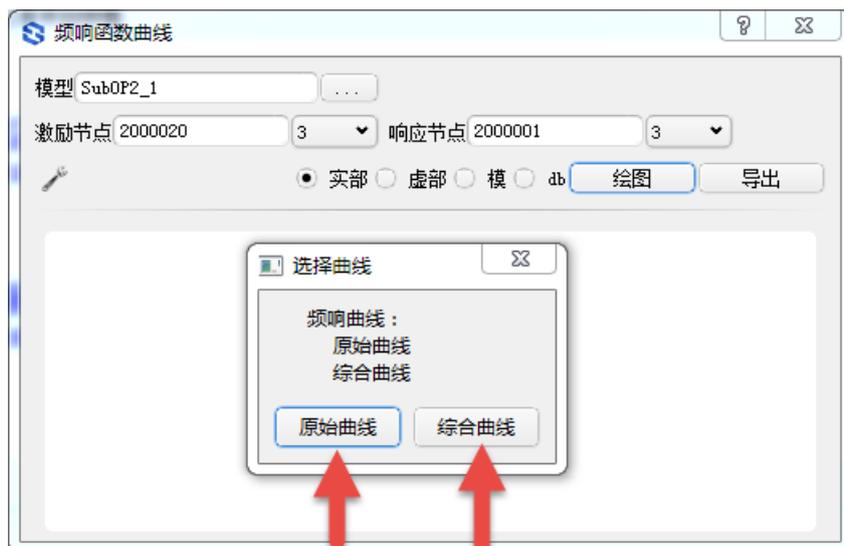


图 4.36 设置 SubOP2_1 子结构查看数据

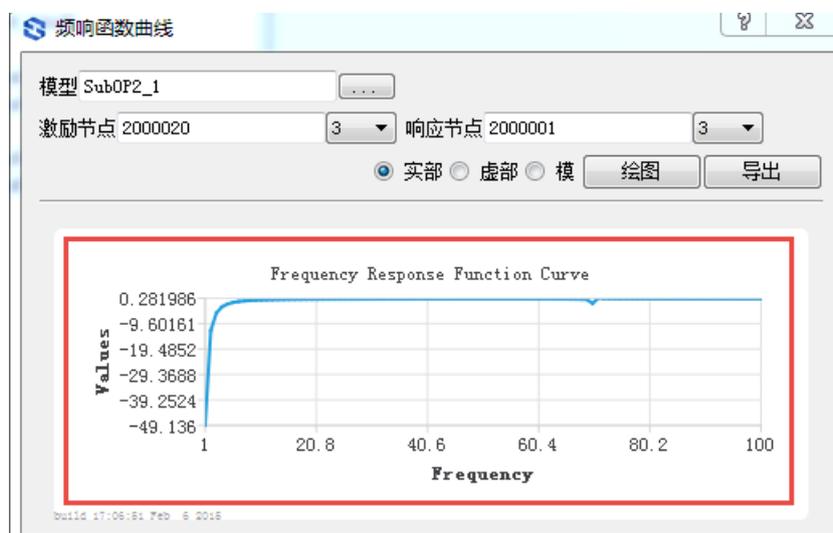


图 4.37 SubOP2_1 子结构综合前频响

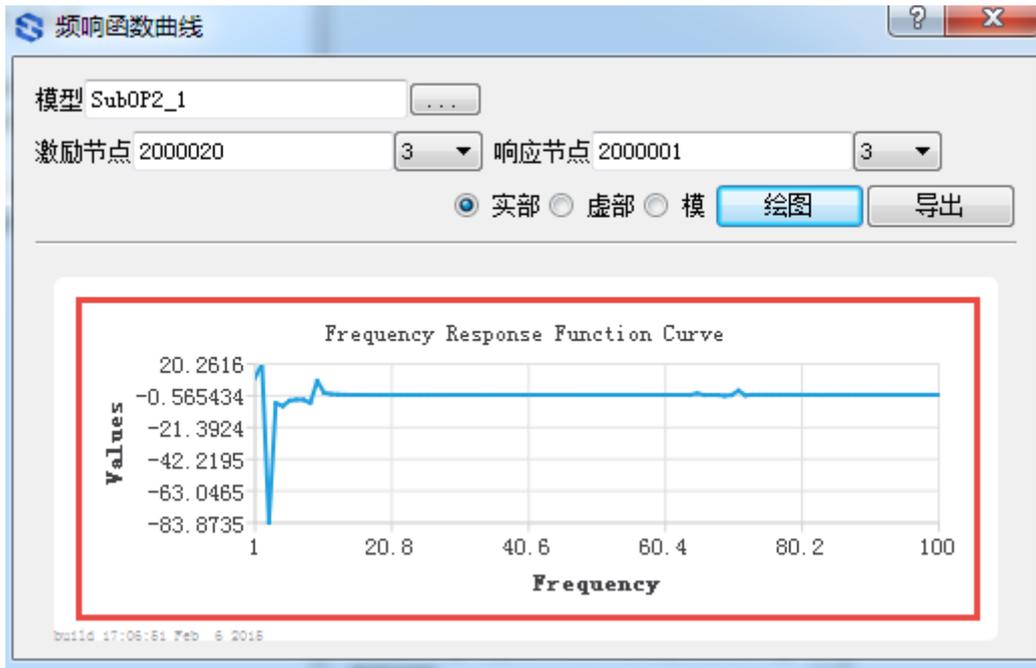


图 4.38 SubOP2_1 子结构综合后频响

5 风电塔频响综合算例平台操作流程

SiPESC 平台集成了频响综合的计算方法，既能计算有限元模型之间的综合，也能计算试验模型和有限元模型之间的综合，为了使用户掌握有限元模型之间频响综合方法的操作流程，特以风电塔模型来演示，试验模型与有限元模型之间综合方法的操作流程在另一以汽车为算例的文档中演示，请读者自行查阅。

5.1 目的

使用户掌握有限元模型之间频响综合方法的操作流程。

5.2 准备

含位移频响综合插件的 SiPESC 平台。
插件依赖：有限元、后处理相关插件。

5.3 所需文件

各个子结构的 bdf 文件（包含有限元信息）：jicang-sip.bdf, tatong-sip.bdf, yepian1-sip.bdf, yepian2-sip.bdf, yepian3-sip.bdf

各个子结构的 op2 文件（包含模态信息）：jicang.op2, tatong.op2, yepian1.op2, yepian2.op2, yepian3.op2

所需文件放在“频响综合-风电塔”文件夹下（由于模型文件较大，暂不提供）。

说明：风电塔共分为 5 个子结构，机舱、塔筒、叶片 1、叶片 2 和叶片 3，使用有限元建模的过程和生成各个子结构文件的方法在这里不再详述。需要说明的一点，若用户需要自行建立其他模型计算，为了保证计算精度，各个子结构的模态阶数对应的最大频率应为所计算频率的 3-4 倍。

5.4 操作流程

(1) 配置所需插件。

打开 SiPESC 平台，点击菜单栏“窗口→配置”选项，打开“配置”对话框。在对话框左侧列表中，选择“通用→启动与关闭”，打开“启动与关闭配置”页面。点击“全部选择”，点“确定”结束，如图 5.1 所示。（对于有一定基础的用户，可以仅仅选择所需插件加载）

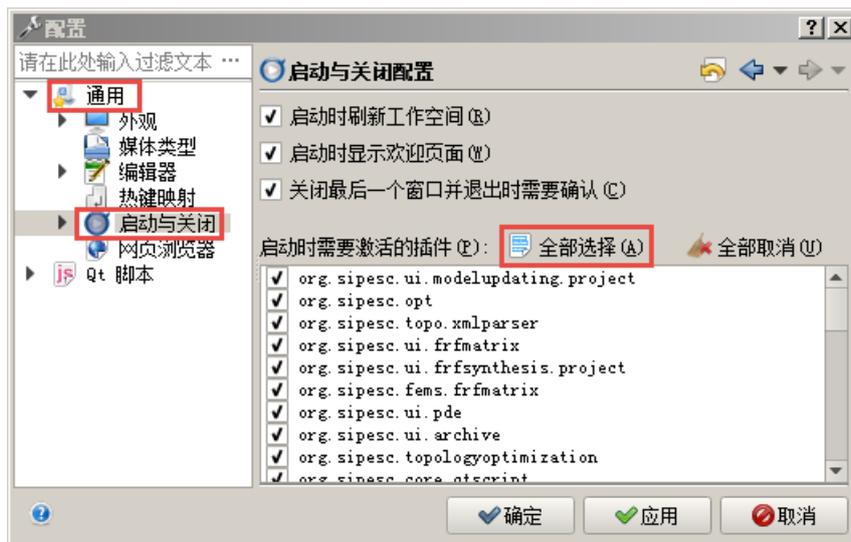


图 5.1 平台插件配置

(2) 配置快捷菜单

为了更方便的使用频响综合功能，我们将此功能添加到“新建”快捷列表中。点击菜单栏“窗口→自定义视角”，打开“自定义视角”对话框。在对话框中点击“快捷数据”选项卡，左侧“子菜单”下选中“新建”，下面“快捷数据分类”中选中“协同仿真系统”，右侧“快捷数据”列出的两个选项中选中“频响综合项目”，并点击“确定”，如图 5.2 所示。



图 5.2 添加频响综合快捷方式

(3) 新建项目

点击菜单栏“文件→新建→频响综合项目”，或者点击工具栏新建按钮旁的黑色三角按钮，如图 5.3 所示。打开“新建频响综合项目”对话框，在话框依次输入文件的名称和工作目录，并点击“完成”结束，如图 5.4 所示。

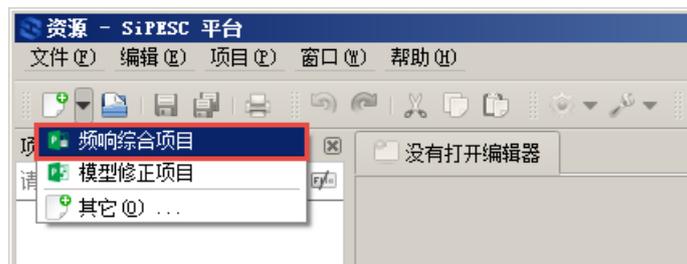


图 5.3 新建频响综合工程

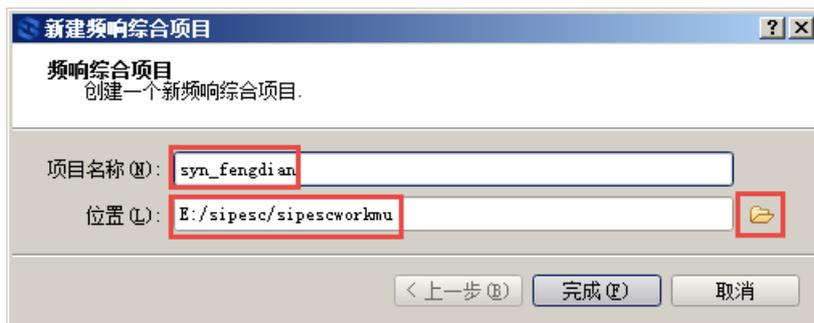


图 5.4 设置工程名称和工作路径

此时，平台左侧的“项目浏览器”中将会出现刚刚创建的项目，如图 5.5 所示。



图 5.5 项目浏览器中新建的工程

(4) 添加机舱模态数据文件 (op2)

如图 5.6，右键点击“模型”，弹出右键菜单中选择“添加模型”，打开“打开文件”对话框。选择项目文件夹下已经准备好的文件“jicang.op2”，点击“打开”结束，如图 5.7。添加的模型名称默认为“SubOP2_1”。

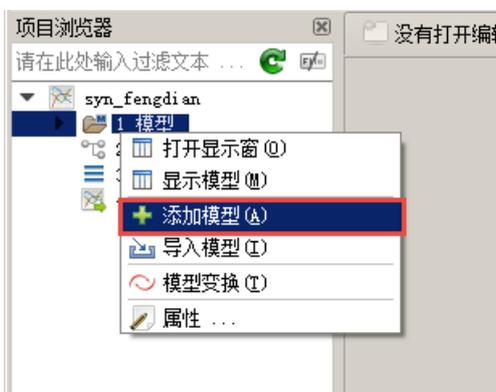


图 5.6 添加模型

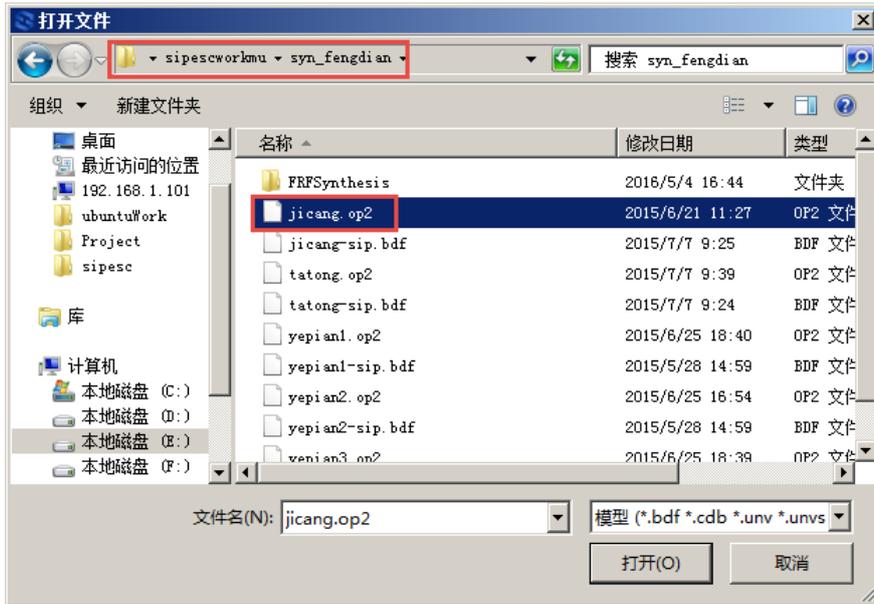


图 5.7 选择有限元模型结果文件

(5) 添加机舱网格文件 (bdf)

如图 5.8，右键点击“SubOP2_1”，弹出右键菜单中选择“选择网格文件”，打开“打开文件”对话框。选择项目文件夹下已经准备好的文件“jicang-sip.bdf”，并点击“打开”结束，如图 5.9。



图 5.8 添加模型文件

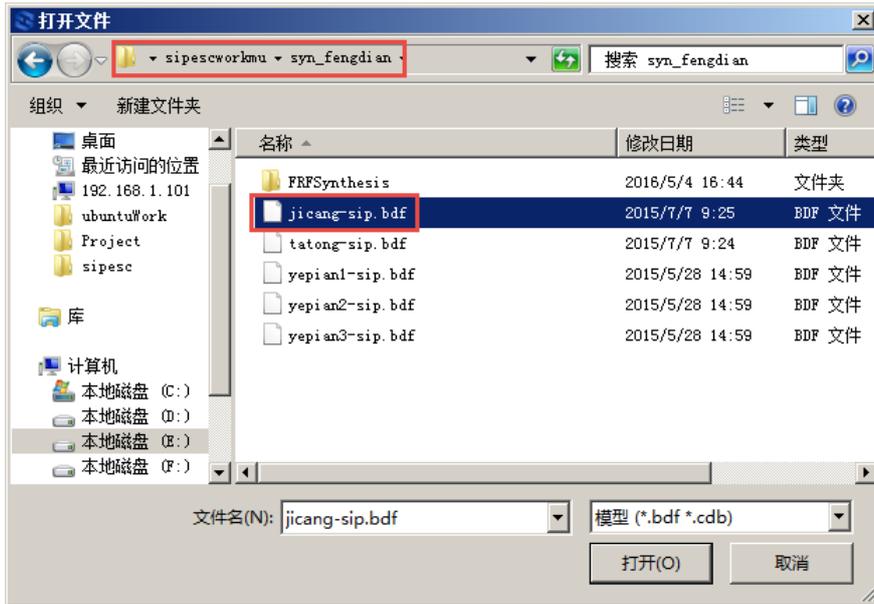


图 5.9 选择模型文件

(6) 此时，机舱子结构所需文件已全部添加。按照步骤（4）和（5）将剩余子结构所需的 op2 文件和 bdf 文件分别添加，注意每个子结构要先添加 op2 文件再添加 bdf 文件，全部添加后如图 5.10 所示。

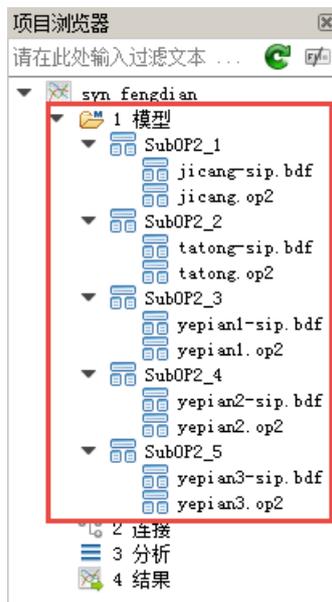


图 5.10 各个子结构相应文件导入后图示

(7) 导入模型

如图 5.11，右键点击“模型”，弹出右键菜单中选择“打开显示窗”，平台中部编辑区新建一个 Mesher 窗口。再次右键“模型”，右键菜单中选择“导入模型”，如图 5.12，之后等待模型导入，直至出现“模型导入完成”窗口，点击“确定”，导入后的模型如图 5.13 所示。

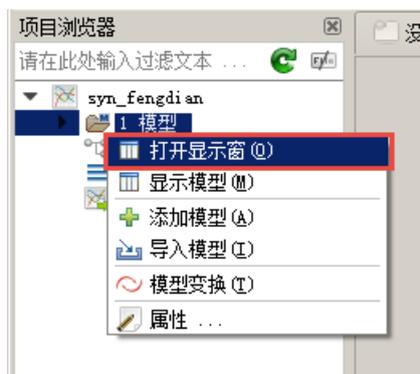


图 5.11 打开 Mesher 窗口

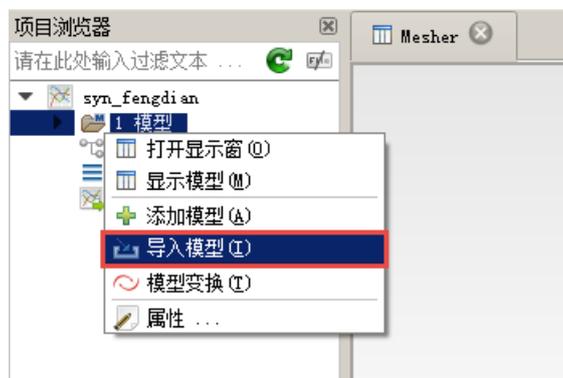


图 5.12 导入模型

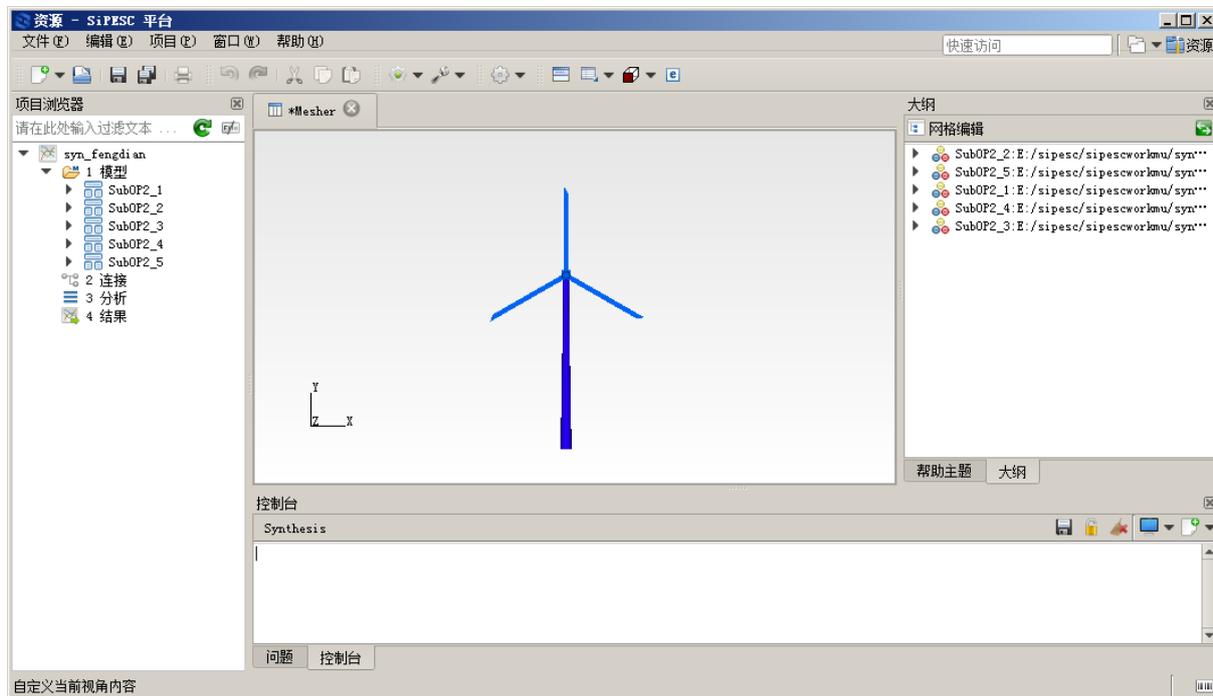


图 5.13 模型导入后图示

(8) 查看输入输出点

由于输入输出点信息已写在各个子结构 bdf 文件中，故不需重新定义，只需查看即可（必须查看，否则不能进行下一步）。如图 5.14，右键子结构（SubOP2_1 等），右键菜单中选择“定义激励响

应点”，打开“选择激励响应点”对话框。可以看到已经定义好的激励响应点，点击“确定”关闭窗口，如图 5.15。

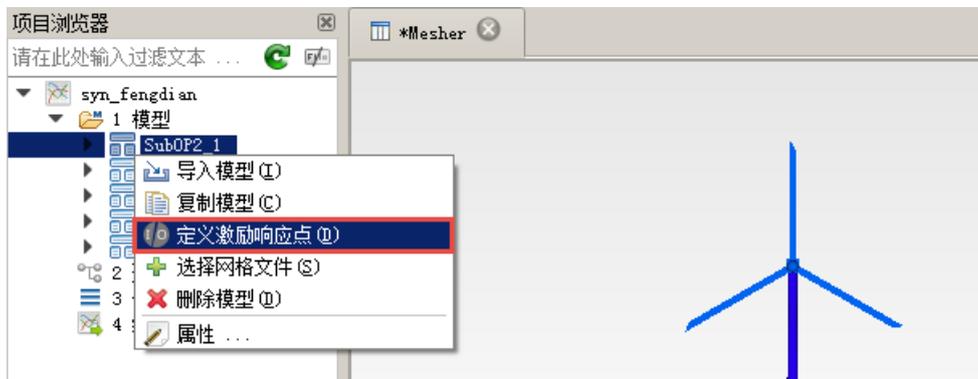


图 5.14 定义激励点和响应点



图 5.15 查看激励点和响应点后完成定义

注：关于 bdf 定义激励响应点，仿照 Nastran bdf 格式定义的新词条，RESP1 表示激励点，EXCI1 表示响应点。

```
RESP1 1 123456 108676 108679 108682 108685
EXCI1 1 123456 108676 108679 108682 108685
```

图 5.16 bdf 激励响应点词条格式

(9) 定义连接点

如图 5.17，右键点击“连接”，弹出右键菜单中选择“添加连接点”，打开“连接集”对话框。如图 5.18，进行如下操作建立连接关系：

- ① 选择刚性连接；
- ② 点击按钮，选择 SubOP2_1 为主子结构；（图 5.19）
- ③ 点击按钮，选择 SubOP2_2 为从子结构；（图 5.19）
- ④ 勾选六个自由度（默认六个均被选择）；
- ⑤ 点击右上角的“A”（根据容差自动匹配连接点），打开“容差”对话框，设置节点距离容差为 0.01，点击“确定”。（图 5.20）

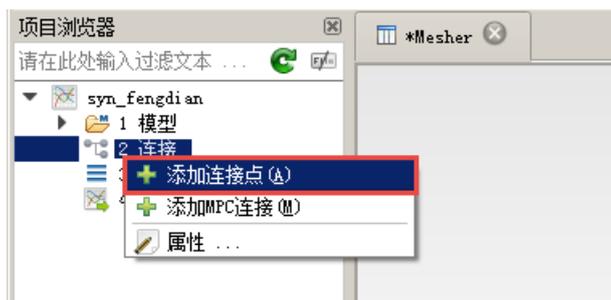


图 5.17 添加连接点

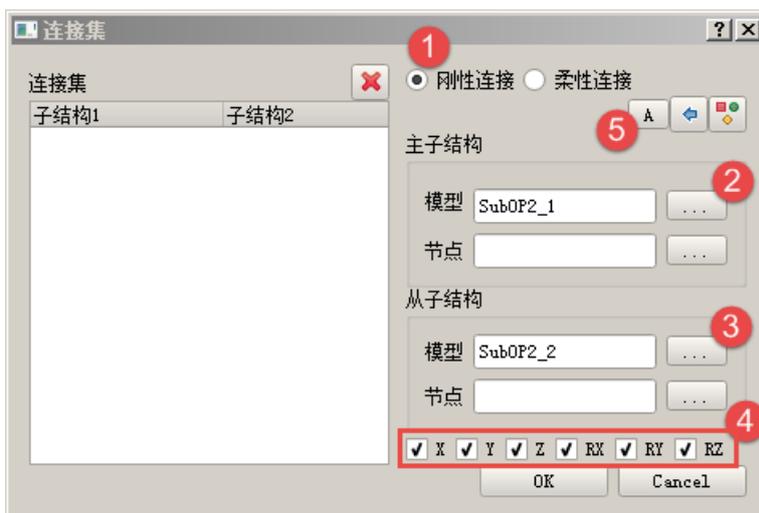


图 5.18 选择主子结构模型

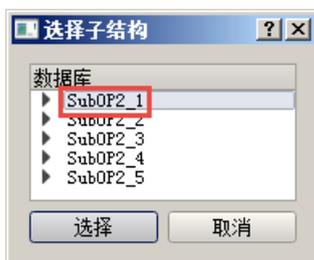


图 5.19 选择相应主（从）子结构



图 5.20 设置连接点容差

此时，SubOP2_1 与 SubOP2_2 之间的连接定义完成，“连接集”对话框左侧可以看到新建立的连接关系，如图 5.21。第一级 SubOP2_1 表示子结构名称，第二级 108676 表示连接节点，第三级 123456 表示连接自由度。

重复上述操作，添加三个叶片和机舱的连接。定义完成后的连接点如图 5.22，点击“确定”完成。

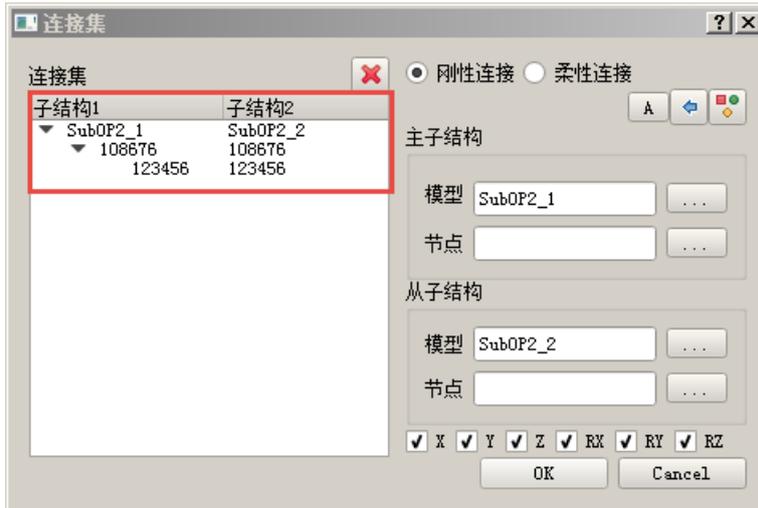


图 5.21 连接集

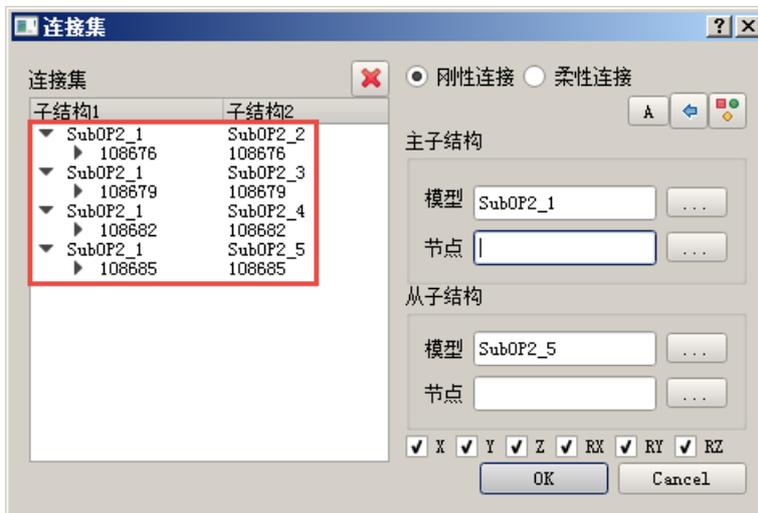


图 5.22 各个子结构添加完成后图示

(10) 设置频率计算区间和步长

如图 5.23，右键点击“分析”，弹出右键菜单中选择“配置求解器”，打开“分析设置”对话框，设置最小频率、频率增量和频率个数，并点“确定”结束，如图 5.24。

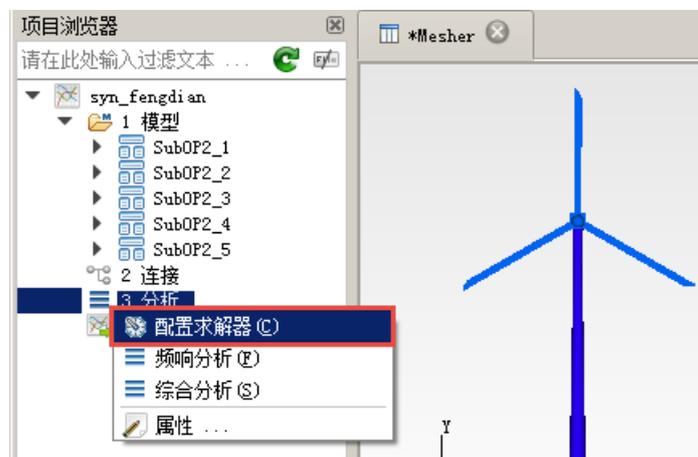


图 5.23 选择求解频率范围及步长

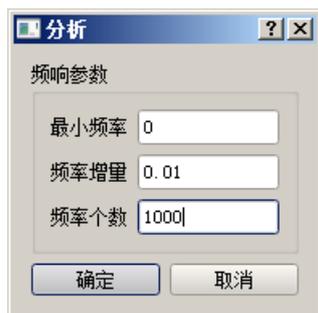


图 5.24 设置频率范围及步长

(11) 计算各个子结构频响

如图 5.25，右键点击“分析”，弹出右键菜单中选择“频响分析”，之后等待，直至弹出计算完成窗口，点击“确定”，如图 5.26。

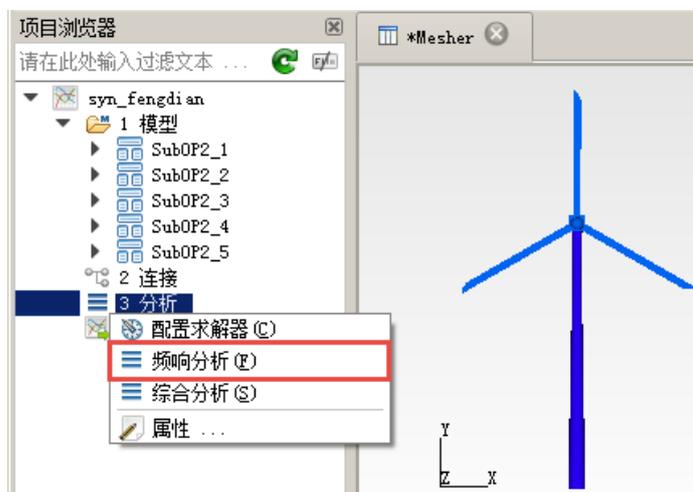


图 5.25 计算各个子结构频响



图 5.26 各个子结构频响计算完成后图示

(12) 频响综合

如图 5.27，右键点击“分析”，弹出右键菜单中选择“综合分析”，之后等待，直至弹出计算完成窗口，点击“确定”，如图 5.28。

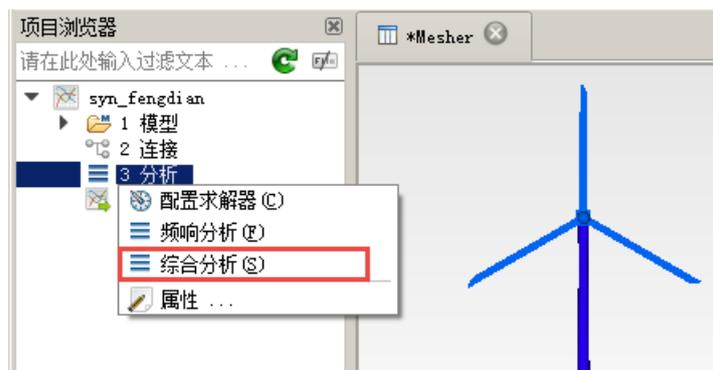


图 5.27 各个子结构频响综合计算



图 5.28 频响综合计算完成后图示

(13) 查看结果

如图 5.29，右键点击“结果”，弹出右键菜单中选择“更新结果”，新结果将会列于“结果”下，分别为“子结构”和“装配整体”。



图 5.29 更新计算结果

我们先来查看整体的综合结果，如图 5.30，右键点击“装配整体”，弹出右键菜单中选择“查看结果”，打开“频响函数曲线”对话框。



图 5.30 查看综合结果

在“频响函数曲线”对话框中将想要展示的结果信息填入，此题的激励节点为“塔筒”子结构的 83434 节点，方向为 x，响应节点为“叶片 3”的 23291 节点，方向为 x，依次将信息填入并点“绘图”，所需激励点响应点的位移频响函数就绘制出来了，如图 5.31，我们还可以将结果导出，点击“导出”，弹出的选项卡选择导出文件夹，填入文件名，点“保存”即可，如图 5.32，结果将会以表格的形式保存。

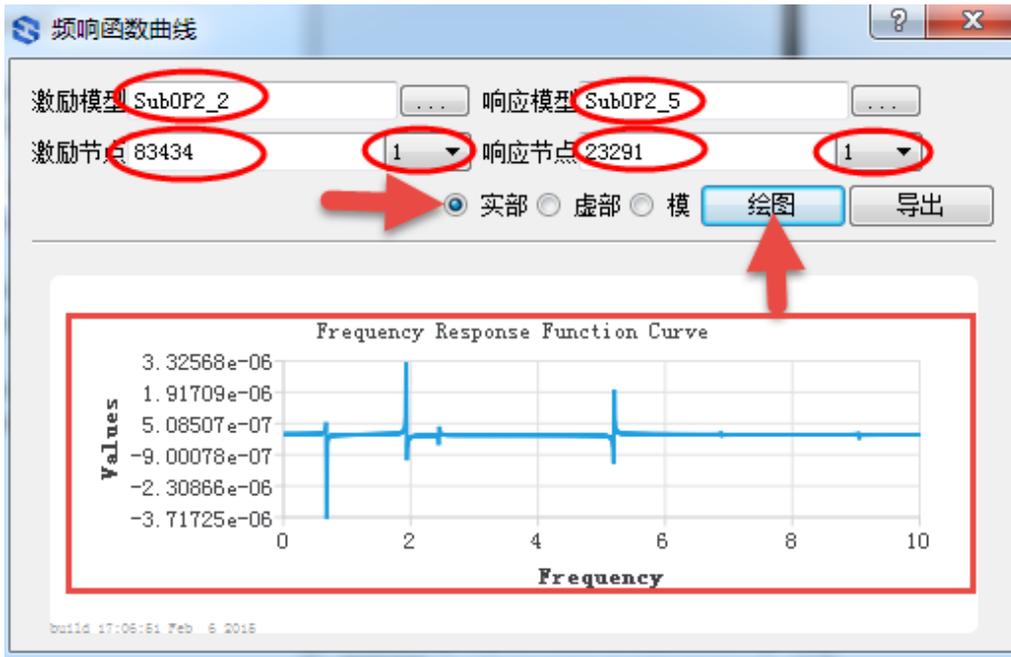


图 5.31 设置查看数据及结果图示

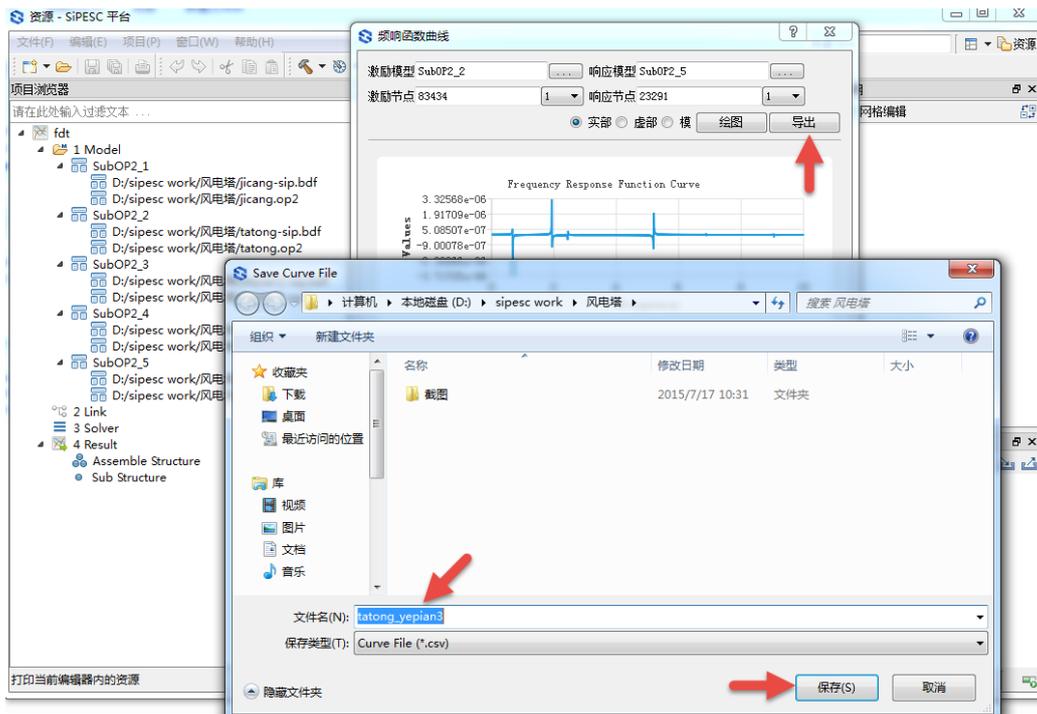


图 5.32 导出结果

接着可以查看各个子结构参加综合之前的频响和综合之后的频响，右键“子结构”，并点击“查看结果”，打开“频响函数曲线”对话框。在对话框中填好所需子结构和激励响应信息，然后点击“绘图”，弹出的选项卡可以查看综合之前的频响(Original)或综合之后的频响(Synthesis)，如图 5.33，综合之前的频响(Original)和综合之后的频响(Synthesis)分别见图 5.34 和图 5.35，当然我们也可以导出结果，如前所述。

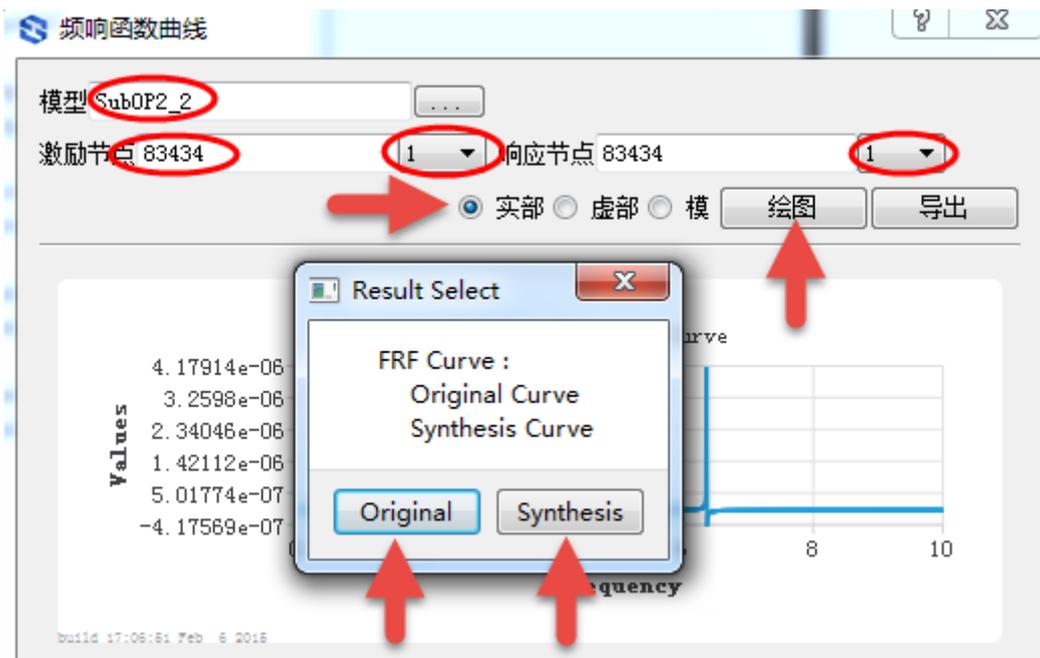


图 5.33 设置 SubOP2_2 子结构查看数据

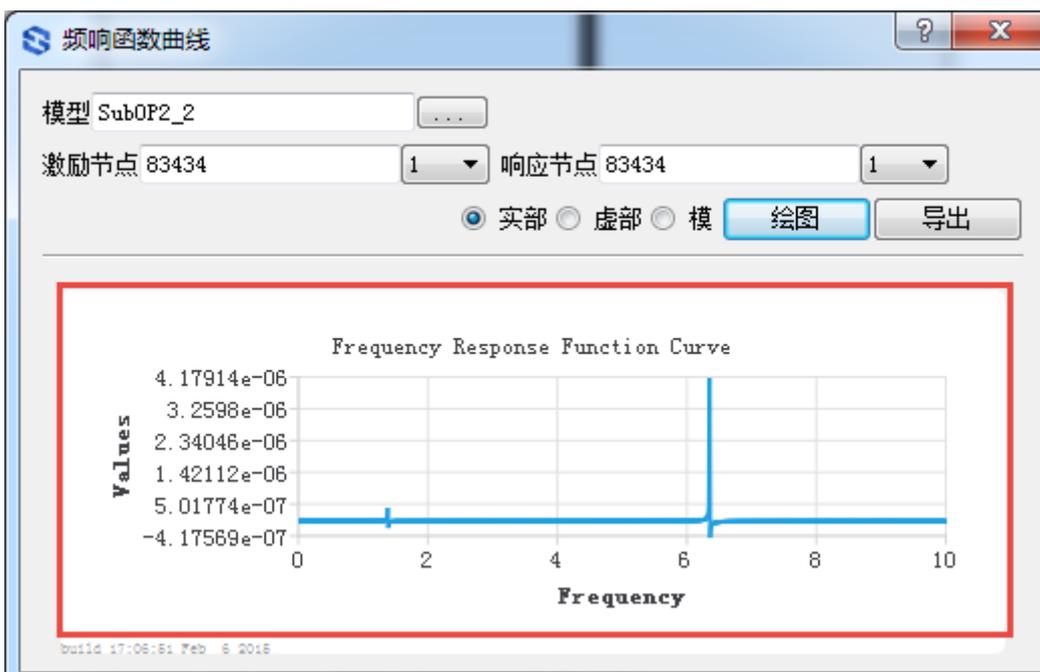


图 5.34 SubOP2_2 子结构综合前结果

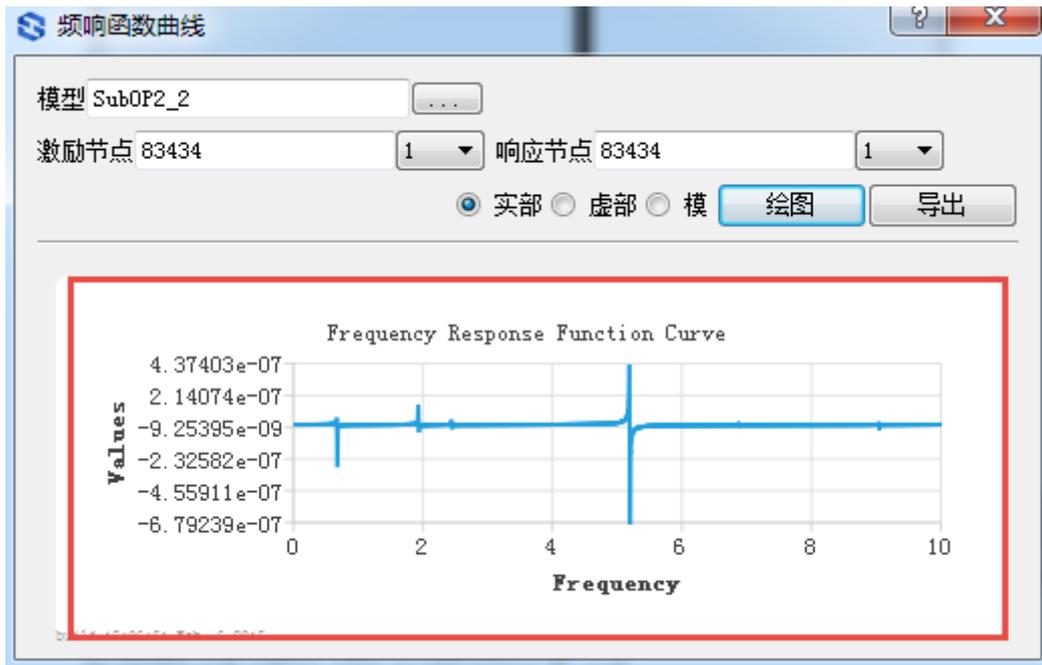


图 5.35 SubOP2_2 子结构综合后结果