

版本号		密级	内部
		阶段 标记	
会 签			
	<hr/> GoHeat 使用手册 <hr/>		
	<p style="text-align: center;">编写 _____</p> <p style="text-align: center;">校对 _____</p> <p style="text-align: center;">审核 _____</p> <p style="text-align: center;">标审 _____</p> <p style="text-align: center;">批准 _____</p>		
文档编号	凌 空 天 行		
RJ-QD002SJ009			

目录

1 软件基本概况	1
2 软件基本约定	1
2.1 坐标系说明	1
2.2 几何模型处理	2
2.3 流线截取位置说明	9
3 GOHEAT 界面操作	10
3.1 运行软件	10
3.2 物理量单位说明	12
3.3 几何模型处理	12
3.4 空间网格生成	14
3.5 流场求解	18
3.6 多工况气动扫掠计算	22
3.7 分部件气动载荷	24
3.7.1 分站件气动六分量	25
3.7.2 舵铰链力矩	26
3.7.3 底阻	27
3.8 气动热求解模块	29
3.8.1 单工况热流计算	29
3.8.2 沿弹道热流计算	31
3.9 一维热响应计算	36
3.9.1 材料库管理	37
3.9.2 材料辐射率	38
3.9.3 防热方案设计	38
3.10 三维热响应计算	40
3.10.1 运行结果转换脚本	41
3.10.2 打开 workbench 工程	42

3.10.3 新建“瞬态热”	43
3.10.4 工程数据配置	44
3.10.5 几何结构和模型	45
3.10.6 求解瞬态热	46
3.11 脚本运行说明	49
3.11.1 二次开发接口说明	49
3.11.2 粘性修正部分	50
4 文件说明	50

软盘编号

1 软件基本概况

CAD

GoHeat 是一款自动化程度高、鲁棒性强、可靠性高的气动力/热计算软件，能够为飞行器方案论证高效地提供气动数据。软件包括自动化网格生成、Euler 求解器、摩阻修正、气动热求解器、分部件气动载荷提取、结构热响应计算等核心模块，其中，网格生成采用几何自适应笛卡尔网格，流场求解采用多重网格及 openmp 并行加速收敛技术，气动热采用基于 Euler 流场的流线追踪法进行计算，热响应采用一维热传导方程计算，此外，软件提供三维气动热/热响应计算方法接口。该文档对软件的操作过程进行说明。

2 软件基本约定

2.1 坐标系说明

图 1 中， $Ox_cY_cZ_c$ 为计算坐标系，几何模型处理及物面网格生成在此坐标系下进行，坐标原点置于几何模型端头顶点处， X_c 轴过发动机轴线， Y_c 轴位于纵向平面内指向上， Z_c 满足右手定则。

注意：模型/网格导入需严格按照此坐标系，并且设定为 m 单位制。

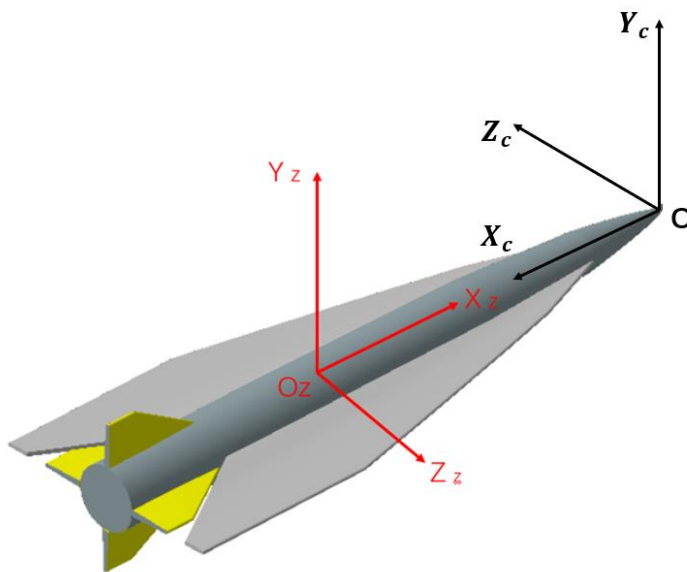


图 1 计算坐标系示意图

图 2 中， $Ox_bY_bZ_b$ 为（临时）体轴系，软件计算获得的气动力六分量、分部件气动六分量均在此坐标系下给出，该坐标系原点同样为 O， X_b 与 X_c 共轴反向， Y_c 与 Y_b 共轴同向。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 1 页

软盘编号

CAD

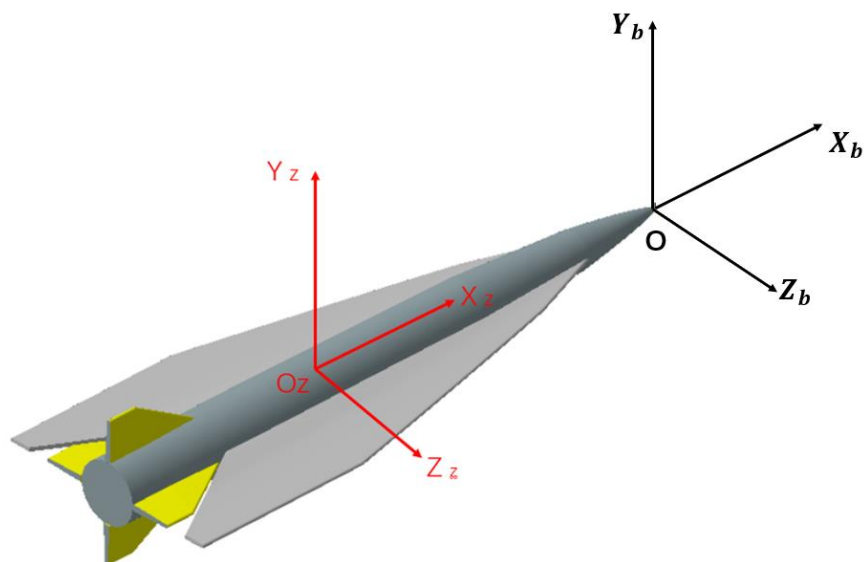


图 2 体轴系示意图

2.2 几何模型处理

软件的几何模型输入统一为 STL 格式，需要借助商业软件（ICEM、POINTWISE 等）在 CAD 模型上生成表面网格并输出 STL，特别注意表面网格应该满足以下要求：

- 1) “水密”性，网格面之间是点对点连接的，不存在搭接或缝隙，可以通过相应商业软件进行“水密”性检测；
- 2) 网格疏密分布合理，输入的表面网格一方面作为几何模型，另一方面作为物面流场输出载体（浸没边界法没有物面网格），所以要求物面网格稀疏分布合理，能够体现流动分布情况，特别在曲率半径较大的地方网格要额外加密并且过度匀称；
- 3) 多部件组合，可以输入多个几何部件，如翼/舵可单独导入，方便通道舵偏角调整。

这里以 Pointwise 软件使用为例，对几何模型处理及网格生成进行说明。

Pointwise 程序界面主要包括菜单栏、工具栏、参数面板、网格显示窗口、信息显示窗口和状态栏，如图所示。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

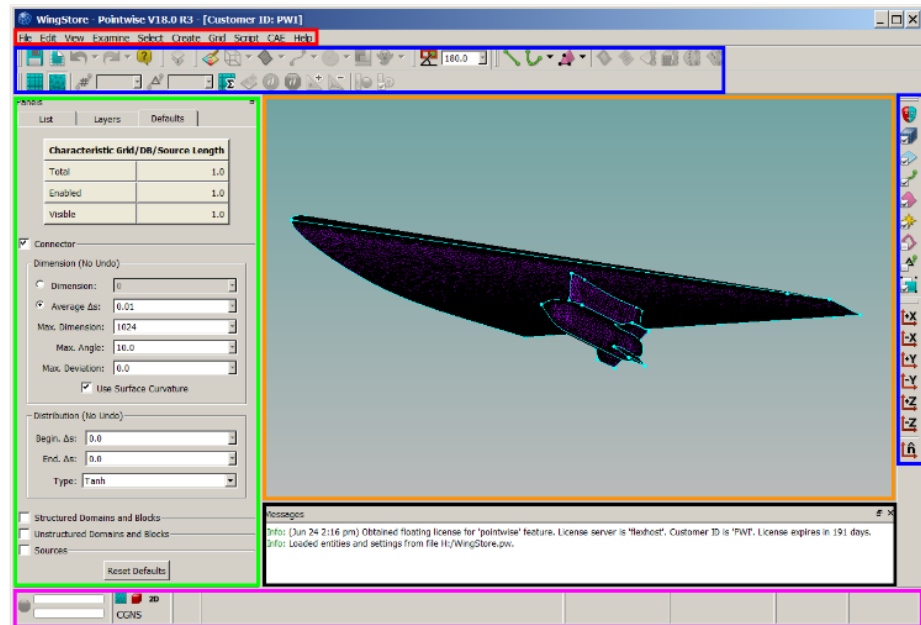
(更改单号)

(签字、日期)

第 2 页

软盘编号

CAD



- Menus □ Toolbars □ Panels
□ Display window □ Messages window □ Status Bar

图 3 Pointwise 界面

通常采用 CATIA 等几何建模软件可以导出气动模型，该模型只包含气动外形型面，不包含内部的结构细节，可以导出 STP 格式的气动模型，作为说明的样例。

1) 导入模型 (stp 格式)。

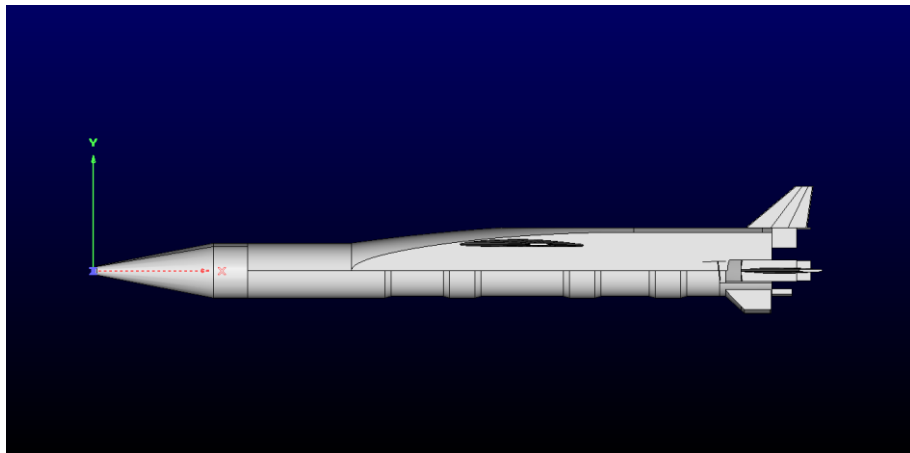


图 4 模型导入示意图

- 2) 一般模型是面对称的，可以添加一个平面（如 $z=0$ 平面），利用该平面拆分模型的 Database, 然后删除一半模型。针对剩余一半模型绘制物面网格，最后通过镜像的形式补全整个模型表面网格，这样既可以减少工作量，也可以保持物面网格的面对称性质。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

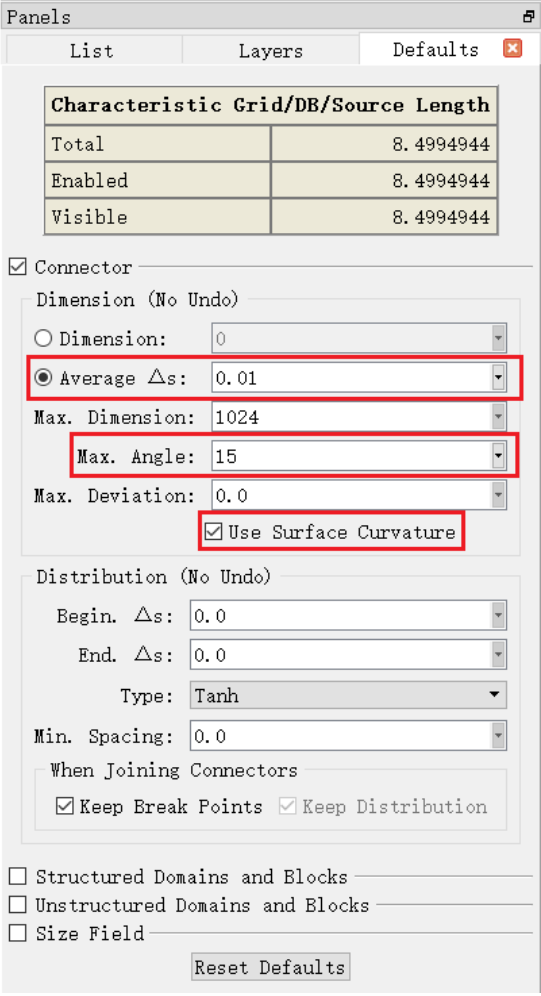
(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

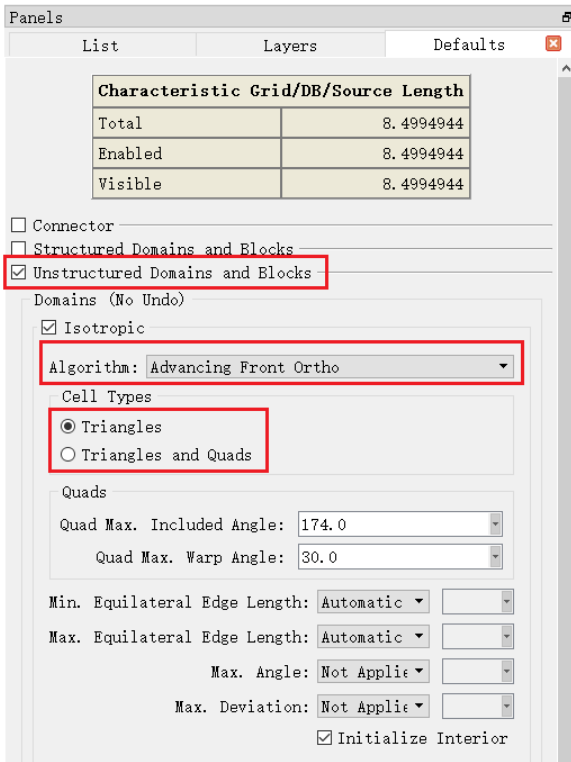
第 3 页

软盘编号					
CAD					
	<div data-bbox="678 129 1093 795" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="411 806 1327 1265" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="670 1288 1069 1332">图 5 利用对称轴拆分模型示意图</p> <p data-bbox="327 1332 1484 1444">3) 设置网格生成参数。设置 Average Δs (该值要根据模型的尺寸调整), 勾选 Use Surface Curvature, Unstructured Domains and Blocks, Isotropic 等</p>				
(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
				第 4 页	
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 4 页	

软盘编号					
CAD					
(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 5 页	

(a)

软盘编号
CAD



(b)

图 6 设置网格生成参数

4) 选中全部 database, 自动生成网格;



图 7 自动化表面网格生成

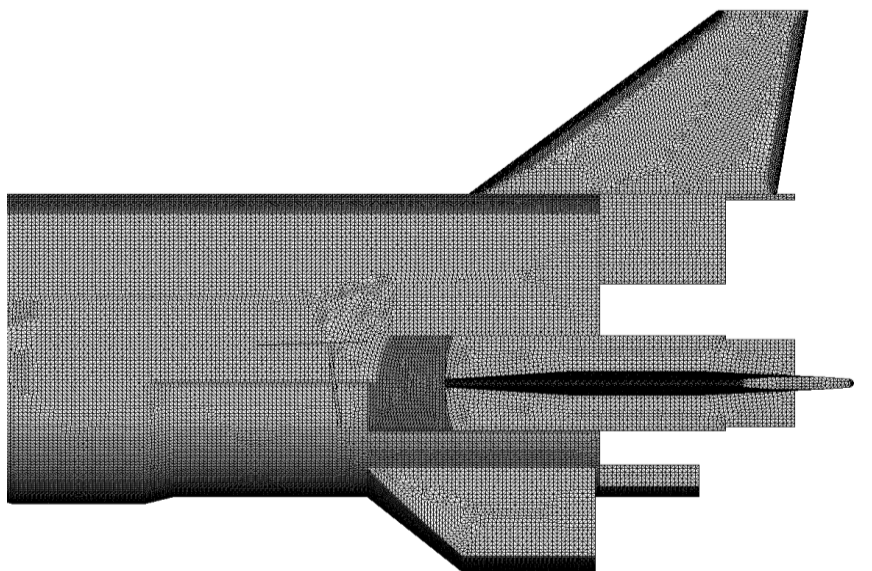


图 8 物面网格示意图

(旧底图登记号)
(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 6 页	

软盘编号

CAD

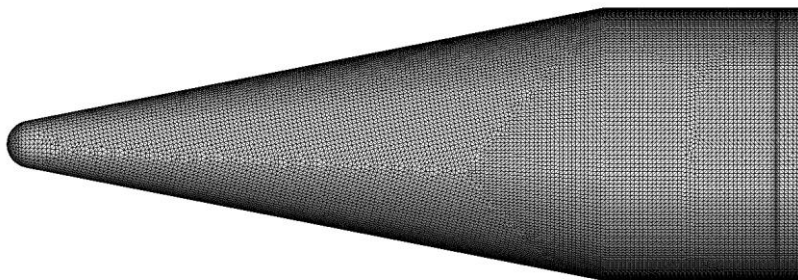


图 9 表面网格示意图

- 5) 通过 Grid->Merge 查看是否存在自由边。根据需要删除和补充线条和面网格。补充缺失的线段，可以设置线段的节点数。



图 10 设置线段节点数

- 6) 由封闭曲线补充面网格。选择多条线段，构成封闭环，单击 AssembleDomain, 生成面网格。

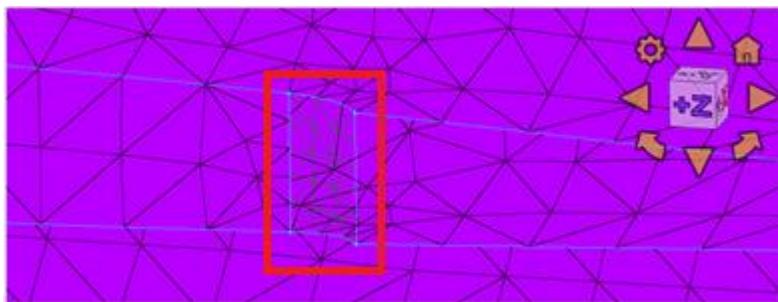


图 11 由线生成网格

- 7) 翼舵的处理：如果翼与弹身之间接触面网格重复，需删除自动生成的弹身网格面和舵接触面网格，以及相关线条，手动重新画线，连接弹身和翼，将新线条投影到模型表面，利用新线条重新生成曲面网格。如果舵与弹体没有接触，可以作为多个模型部件导出。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 7 页

软盘编号

CAD

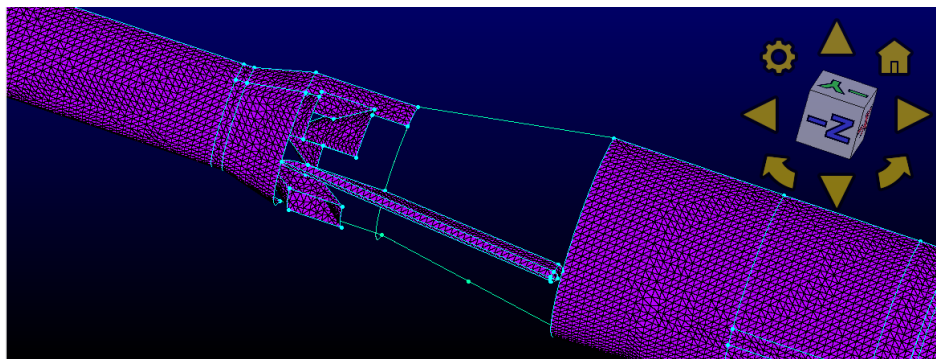


图 12 处理舵与弹身相交

- 8) 带孔的面网格处理。单击 Create→assemble special→Domain, 逆时针选择外圈封闭曲线, 点击 SaveEdge, 反方向选择内圈封闭曲线, 选择 SaveEdge, 单击 OK, 生成曲面。

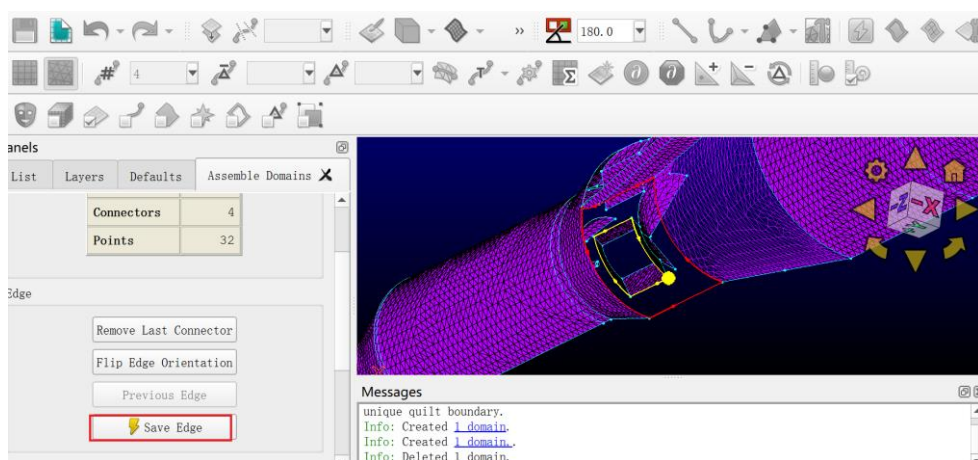


图 13 带孔的面网格处理

- 9) 可以利用 Grid→Merge 查看是否存在自由边, 根据提示不断调整, 直到整个物面网格水密。然后导出 stl 格式的表面网格。Free 边会在模型显示窗口, 需要手动进行调整; 直到 Free 为 0。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 8 页

软盘编号
CAD

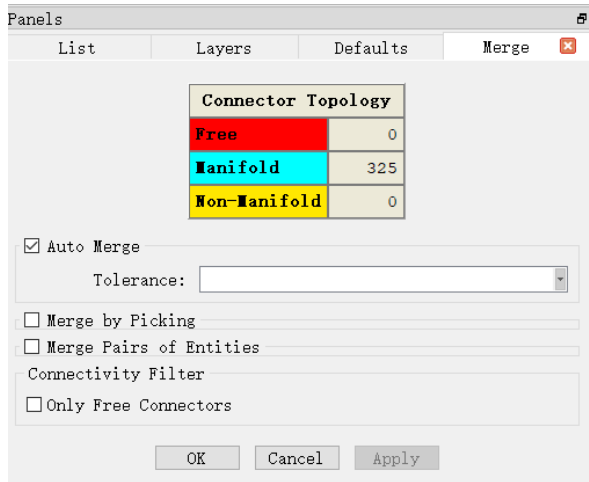


图 14 检查自由边

2.3 流线截取位置说明

这里对截取位置进行说明，在流线追踪过程中，我们认为流线起始点在流动附着的地方，以气动外形为例进行说明，见图 15，对于飞行器表面，流线起始点为 $x_0=0.0001m$ ；对于机翼和翼面大面积流线起始点为 x_0 ；对于立尾前缘及大面积，流线起始点为 x_1 。

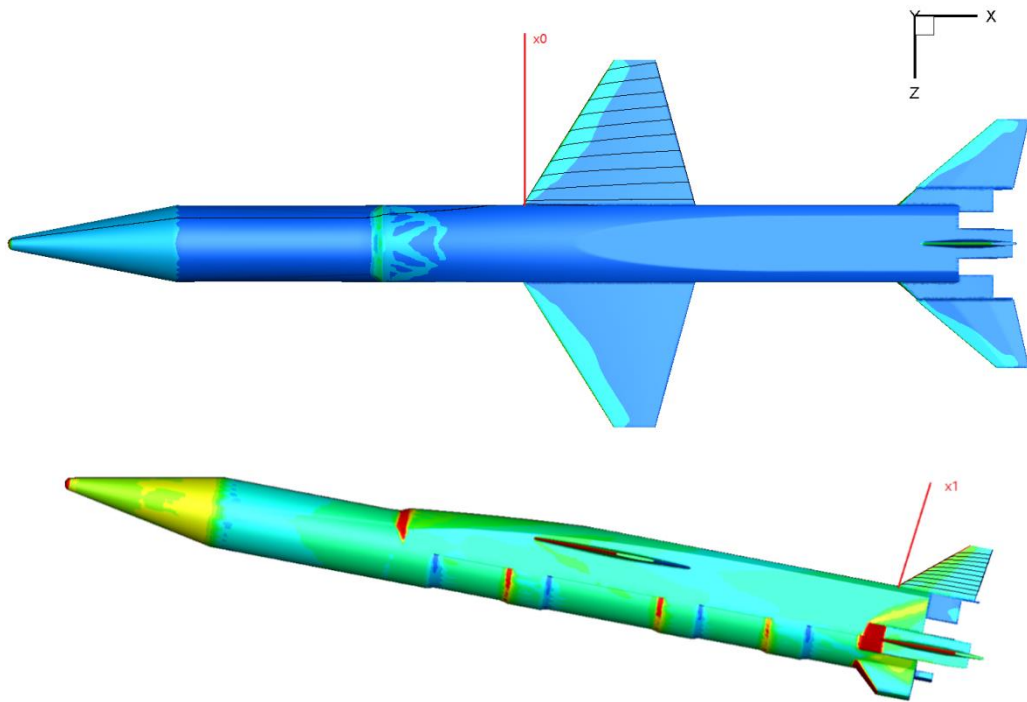


图 15 流线截取位置说明示意图

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 9 页	

软盘编号	<h3>3 GoHeat 界面操作</h3> <p>针对气动热环境计算以及结构热响应模块进行了封装，实现界面化操作，具有良好的人机界面：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 满足微软 Windows 操作系统平台，能够在 Windows XP、Windows 7、Windows 10 等多种操作系统版本下运行，具有良好的人机交互操作界面； 2) 软件能够通过序列号对电脑实施授权控制使用，并由乙方提供序列号生成工具，满足甲方授权及限时使用需求； 3) 具有良好的运行显示功能，包括菜单栏、图形显示界面、操作命令显示界面等，可以实时显示操作信息、计算过程信息和计算结果。并且，操作命令显示界面具有报错功能，当操作出现错误时，给出用户错误信息。 <h4>3.1 运行软件</h4> <p>软件为绿色免安装版本，直接运行 cmd 即可启动软件，软件运行步骤如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 解压文件 GoHeat_vx_GUI.rar，安装/vcredist 下的 vcredist_x64(2013).exe，安装成功后需要重启电脑； 2) 双击“气动热快速计算分析软件.cmd”即可进入软件界面，可以选择 ceshi 作为工作路径，如图 17 所示。 				
CAD					
(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 10 页	

软盘编号																																																																																																									
CAD	<table border="1"> <thead> <tr> <th>名称</th> <th>修改日期</th> <th>类型</th> <th>大小</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>vcredist</td> <td>2022/7/18 16:20</td> <td>文件夹</td> <td></td> </tr> <tr> <td>vtk</td> <td>2022/7/18 16:20</td> <td>文件夹</td> <td></td> </tr> <tr> <td>addViscous.cmd</td> <td>2021/12/20 15:53</td> <td>Windows 命令脚本</td> <td>1 KB</td> </tr> <tr> <td>Cart3D_Gui.exe</td> <td>2022/8/17 15:06</td> <td>应用程序</td> <td>2,594 KB</td> </tr> <tr> <td>Cart3D_Gui_old.exe</td> <td>2022/1/4 15:02</td> <td>应用程序</td> <td>2,594 KB</td> </tr> <tr> <td>D3Dcompiler_47.dll</td> <td>2014/3/11 18:54</td> <td>应用程序扩展</td> <td>4,077 KB</td> </tr> <tr> <td>dtaero - 28d0eacb9fdf.lic</td> <td>2022/8/17 14:57</td> <td>许可?</td> <td>8 KB</td> </tr> <tr> <td>GridViewer.dll</td> <td>2022/1/4 15:01</td> <td>应用程序扩展</td> <td>1,636 KB</td> </tr> <tr> <td>install.zip</td> <td>2021/12/13 10:49</td> <td>WinRAR ZIP 压缩文件</td> <td>3,151 KB</td> </tr> <tr> <td>libEGL.dll</td> <td>2017/1/19 4:57</td> <td>应用程序扩展</td> <td>15 KB</td> </tr> <tr> <td>libGLESV2.dll</td> <td>2017/1/19 4:57</td> <td>应用程序扩展</td> <td>2,487 KB</td> </tr> <tr> <td>logo.ico</td> <td>2021/7/26 10:06</td> <td>ICO 文件</td> <td>67 KB</td> </tr> <tr> <td>multi_flow.cmd</td> <td>2020/4/26 10:02</td> <td>Windows 命令脚本</td> <td>1 KB</td> </tr> <tr> <td>multi_slv.py</td> <td>2020/9/28 18:25</td> <td>PY 文件</td> <td>7 KB</td> </tr> <tr> <td>opengl32sw.dll</td> <td>2016/6/14 20:00</td> <td>应用程序扩展</td> <td>20,433 KB</td> </tr> <tr> <td>PlotTools.dll</td> <td>2022/1/4 15:01</td> <td>应用程序扩展</td> <td>3,261 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5Charts.dll</td> <td>2017/1/19 6:26</td> <td>应用程序扩展</td> <td>1,061 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5Core.dll</td> <td>2021/7/20 19:08</td> <td>应用程序扩展</td> <td>5,531 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5Gui.dll</td> <td>2017/1/19 5:03</td> <td>应用程序扩展</td> <td>5,841 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5PrintSupport.dll</td> <td>2017/1/19 5:09</td> <td>应用程序扩展</td> <td>311 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5Svg.dll</td> <td>2017/1/19 5:31</td> <td>应用程序扩展</td> <td>311 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5Widgets.dll</td> <td>2017/1/19 5:08</td> <td>应用程序扩展</td> <td>5,382 KB</td> </tr> <tr> <td>Qt5Xml.dll</td> <td>2017/1/19 4:57</td> <td>应用程序扩展</td> <td>188 KB</td> </tr> <tr> <td>ViscousOutput.exe</td> <td>2021/7/20 17:40</td> <td>应用程序</td> <td>76 KB</td> </tr> <tr> <td>气动热快速计算分析软件.cmd</td> <td>2021/7/26 15:05</td> <td>Windows 命令脚本</td> <td>1 KB</td> </tr> </tbody> </table>	名称	修改日期	类型	大小	vcredist	2022/7/18 16:20	文件夹		vtk	2022/7/18 16:20	文件夹		addViscous.cmd	2021/12/20 15:53	Windows 命令脚本	1 KB	Cart3D_Gui.exe	2022/8/17 15:06	应用程序	2,594 KB	Cart3D_Gui_old.exe	2022/1/4 15:02	应用程序	2,594 KB	D3Dcompiler_47.dll	2014/3/11 18:54	应用程序扩展	4,077 KB	dtaero - 28d0eacb9fdf.lic	2022/8/17 14:57	许可?	8 KB	GridViewer.dll	2022/1/4 15:01	应用程序扩展	1,636 KB	install.zip	2021/12/13 10:49	WinRAR ZIP 压缩文件	3,151 KB	libEGL.dll	2017/1/19 4:57	应用程序扩展	15 KB	libGLESV2.dll	2017/1/19 4:57	应用程序扩展	2,487 KB	logo.ico	2021/7/26 10:06	ICO 文件	67 KB	multi_flow.cmd	2020/4/26 10:02	Windows 命令脚本	1 KB	multi_slv.py	2020/9/28 18:25	PY 文件	7 KB	opengl32sw.dll	2016/6/14 20:00	应用程序扩展	20,433 KB	PlotTools.dll	2022/1/4 15:01	应用程序扩展	3,261 KB	Qt5Charts.dll	2017/1/19 6:26	应用程序扩展	1,061 KB	Qt5Core.dll	2021/7/20 19:08	应用程序扩展	5,531 KB	Qt5Gui.dll	2017/1/19 5:03	应用程序扩展	5,841 KB	Qt5PrintSupport.dll	2017/1/19 5:09	应用程序扩展	311 KB	Qt5Svg.dll	2017/1/19 5:31	应用程序扩展	311 KB	Qt5Widgets.dll	2017/1/19 5:08	应用程序扩展	5,382 KB	Qt5Xml.dll	2017/1/19 4:57	应用程序扩展	188 KB	ViscousOutput.exe	2021/7/20 17:40	应用程序	76 KB	气动热快速计算分析软件.cmd	2021/7/26 15:05	Windows 命令脚本	1 KB
名称	修改日期	类型	大小																																																																																																						
vcredist	2022/7/18 16:20	文件夹																																																																																																							
vtk	2022/7/18 16:20	文件夹																																																																																																							
addViscous.cmd	2021/12/20 15:53	Windows 命令脚本	1 KB																																																																																																						
Cart3D_Gui.exe	2022/8/17 15:06	应用程序	2,594 KB																																																																																																						
Cart3D_Gui_old.exe	2022/1/4 15:02	应用程序	2,594 KB																																																																																																						
D3Dcompiler_47.dll	2014/3/11 18:54	应用程序扩展	4,077 KB																																																																																																						
dtaero - 28d0eacb9fdf.lic	2022/8/17 14:57	许可?	8 KB																																																																																																						
GridViewer.dll	2022/1/4 15:01	应用程序扩展	1,636 KB																																																																																																						
install.zip	2021/12/13 10:49	WinRAR ZIP 压缩文件	3,151 KB																																																																																																						
libEGL.dll	2017/1/19 4:57	应用程序扩展	15 KB																																																																																																						
libGLESV2.dll	2017/1/19 4:57	应用程序扩展	2,487 KB																																																																																																						
logo.ico	2021/7/26 10:06	ICO 文件	67 KB																																																																																																						
multi_flow.cmd	2020/4/26 10:02	Windows 命令脚本	1 KB																																																																																																						
multi_slv.py	2020/9/28 18:25	PY 文件	7 KB																																																																																																						
opengl32sw.dll	2016/6/14 20:00	应用程序扩展	20,433 KB																																																																																																						
PlotTools.dll	2022/1/4 15:01	应用程序扩展	3,261 KB																																																																																																						
Qt5Charts.dll	2017/1/19 6:26	应用程序扩展	1,061 KB																																																																																																						
Qt5Core.dll	2021/7/20 19:08	应用程序扩展	5,531 KB																																																																																																						
Qt5Gui.dll	2017/1/19 5:03	应用程序扩展	5,841 KB																																																																																																						
Qt5PrintSupport.dll	2017/1/19 5:09	应用程序扩展	311 KB																																																																																																						
Qt5Svg.dll	2017/1/19 5:31	应用程序扩展	311 KB																																																																																																						
Qt5Widgets.dll	2017/1/19 5:08	应用程序扩展	5,382 KB																																																																																																						
Qt5Xml.dll	2017/1/19 4:57	应用程序扩展	188 KB																																																																																																						
ViscousOutput.exe	2021/7/20 17:40	应用程序	76 KB																																																																																																						
气动热快速计算分析软件.cmd	2021/7/26 15:05	Windows 命令脚本	1 KB																																																																																																						

图 16 软件启动方式

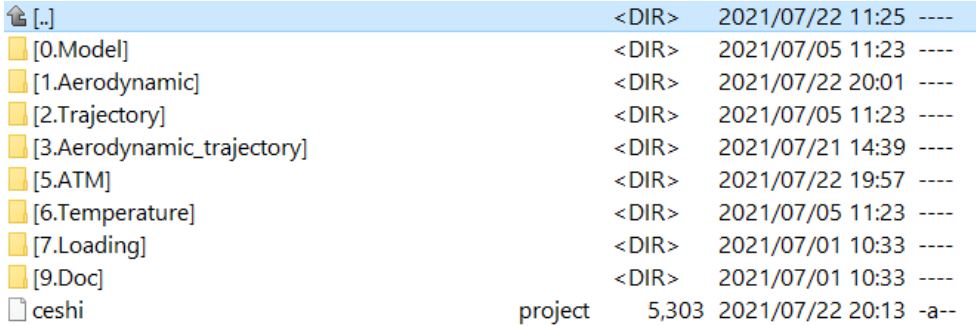


图 17 选择工作路径

点击“新建工程”，软件会自动在选择工程路径下建立如下文件夹，如图 18 所示：

- ✓ 0.model 用于存放数模；
- ✓ 1.Aerodynamic 是气动计算的工作路径；

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 11 页	

软盘编号				
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 2.Trajectory 存放弹道文件； ✓ 3.Aerodynamic_trajectory 是沿飞行弹道计算流场的文件夹； ✓ 5.ATM 是气动热计算文件夹； ✓ 6.Temperature 是结构热响应计算文件夹； 			
CAD				
	图 18 文件夹组织形式			
	<h3>3.2 物理量单位说明</h3> <p>软件中默认导入模型的长宽高等几何尺寸的单位是米（m），参考长度单位（m），参考面积单位（m*m）。</p> <p>热流计算模块输入物理量单位：来流静压（Pa），来流静温（K），壁面温度（K）。</p> <p>热流计算输出文件物理量单位：压力（Pa），焓（kJ/kg），热流（kW/m²）。</p> <p>热响应 TPS 模块输入物理量单位：初始温度（° C）。</p> <p>热响应 TPS 模块输出文件物理量单位：温度（° C），热流（kW/m²）。</p>			
	<h3>3.3 几何模型处理</h3> <p>软件界面包括“前处理”界面、“网格生成”界面、“流场求解”界面以及“后处理”界面，界面形式见图 19，（1）号窗口显示模型的部件编号，（2）号窗口显示软件运行输出，（3）号窗口显示软件运行进度。</p>			
(旧底图登记号)				
(底图登记号)				
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	RJ-QD002
				RJ-QD002SJ009
				第 12 页

软盘编号				
CAD				
(旧底图登记号)				
(底图登记号)	<p>图 19 几何模型处理界面示意图</p> <p>通过“添加部件”按钮，导入 STL 模型之后即可进行布尔运算，将所有几何部件合并为一个部件，运行成功后会在左下窗口输出“Checkout of intersect OK”，右下窗口输出“计算域已更新”；如果布尔运算失败，说明表面网格不满足“水密”性要求，需要重新检查并调整表面网格。</p> <p>图 20 布尔运算显示结果</p>			

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 13 页	

软盘编号

3.4 空间网格生成

CAD

计算网格生成界面见图 21，交互窗口可以显示背景网格、物面网格、加密框网格以及截面网格分布情况，右侧设置栏主要用到“网格信息”、“网格设置”、“网格查看”以及“加密控制”。

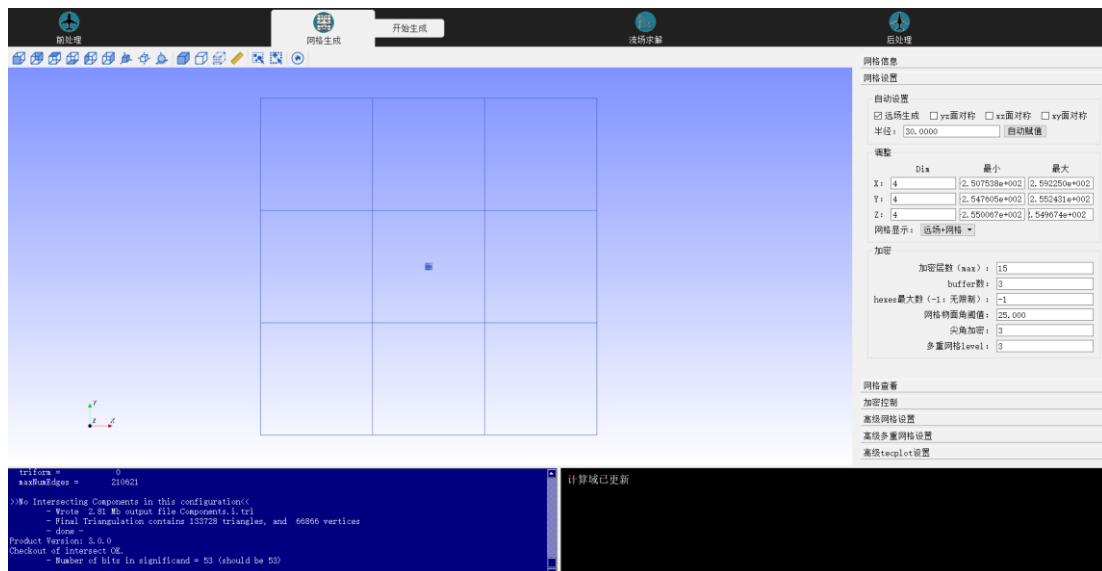


图 21 网格生成界面

在“网格设置”中，计算域离散采用笛卡尔网格（八叉树）进行离散，网格外区默认为 30 倍几何模型最大尺寸，均采用默认值，“加密层数（max）”代表八叉树的深度，可以根据计算机性能选取 14 或 15；软件能够根据几何模型曲率变化进行额外尖角加密，“网格物面角阈值”通常设置为 25° ，“尖角加密”设置为 3，代表面法矢夹角超过 25° 额外加密 3 层，其他参数保持默认即可，见图 22。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

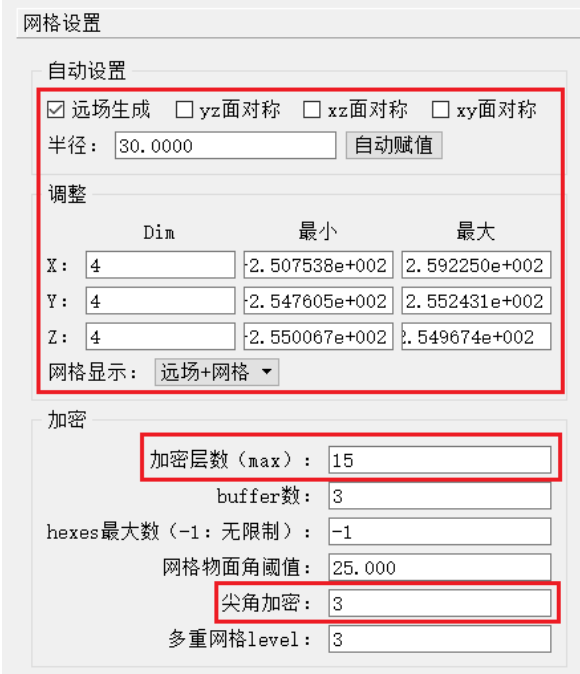
(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 14 页

软盘编号					
CAD					
(旧底图登记号)	<p>对图 22 中的参数说明：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) “半径”：按照导入模型尺寸的 n 倍生成远场空间。n 由用户输入，默认值为 30，表示按照输入模型尺寸的 30 倍生成远场空间域。 2) “自动赋值”：表示按照系统默认参数配置参数。 3) “Dim”：表示空间域中的线段数目 (Dim_x, Dim_y, Dim_z)，这些线段将空间域分成了 (Dim_x-1, Dim_y-1, Dim_z-1) 块计算域。“最小值”表示空间域起始处的坐标，“最大值”表示空间域终止的边界处坐标值。用户可以通过设置最大最小改变空间网格生成的范围，注意，用户的设置可能会引起空间网格的不均匀拉伸。 4) “加密层数 (max)”：八叉树生成空间网格的最大深度。加密层数越大，网格越细密。 5) “buffer 数”：细密网格向粗网格过度层数。buffer 数越大，过度越均匀，网格数目越大。 6) “hexes 最大数”：限制空间网格的数目，-1 表示对此无限制。 7) “网格物面角阈值”：如果物面存在尖角，空间网格需要对此处进行额外加密。根据几何模型曲率变化进行额外尖角加密，默认阈值为 25。 				
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 15 页	

软盘编号

CAD

8) “夹角加密”: 尖角加密的八叉树网格深度, 默认值为 3, 表示在尖角处加密 3 层, 该值越大尖角处网格越细密。

9) “多重网格 level”: 采用多重网格技术中的层数。多重网格级数越多, 计算量越大, 结果越精确。一般采用 3。

在“加密控制”中可以进行 box 加密, 比如主激波区域以及流动干扰较严重的区域, 用户可以设定 box 范围 (通过调整 Xmin、Xmax、Ymin、Ymax、Zmin 和 Zmax) 以及八叉树深度 (通常为 10 或者 11) 进行额外加密, 见图 23。

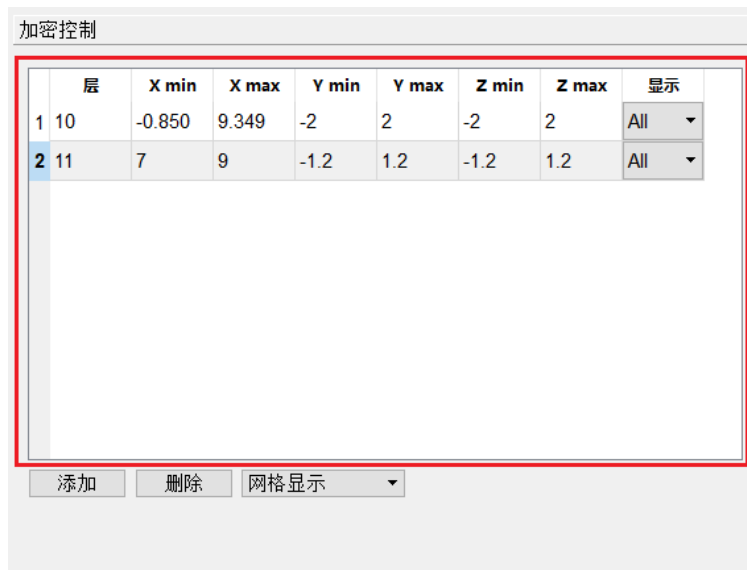


图 23 区域加密控制参数

网格的 box 加密效果见图 24。

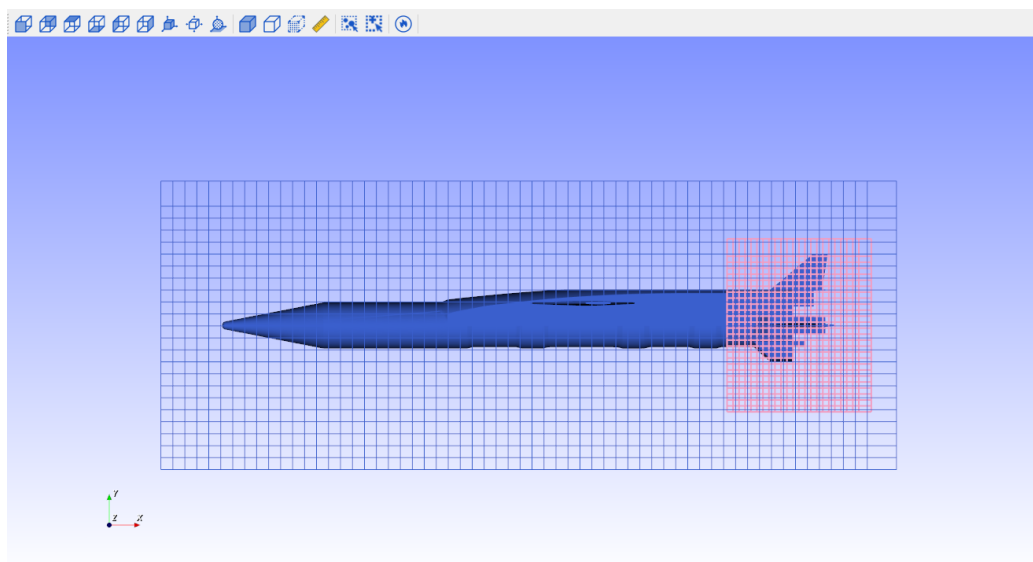


图 24 box 加密效果示意图

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 16 页

软盘编号
CAD

点击“开始生成”，即可生成计算网格及多重网格，运行成功后会在左下窗口显示“done Writing mesh”，右下窗口显示“创建多重网格完成”，见图 25。

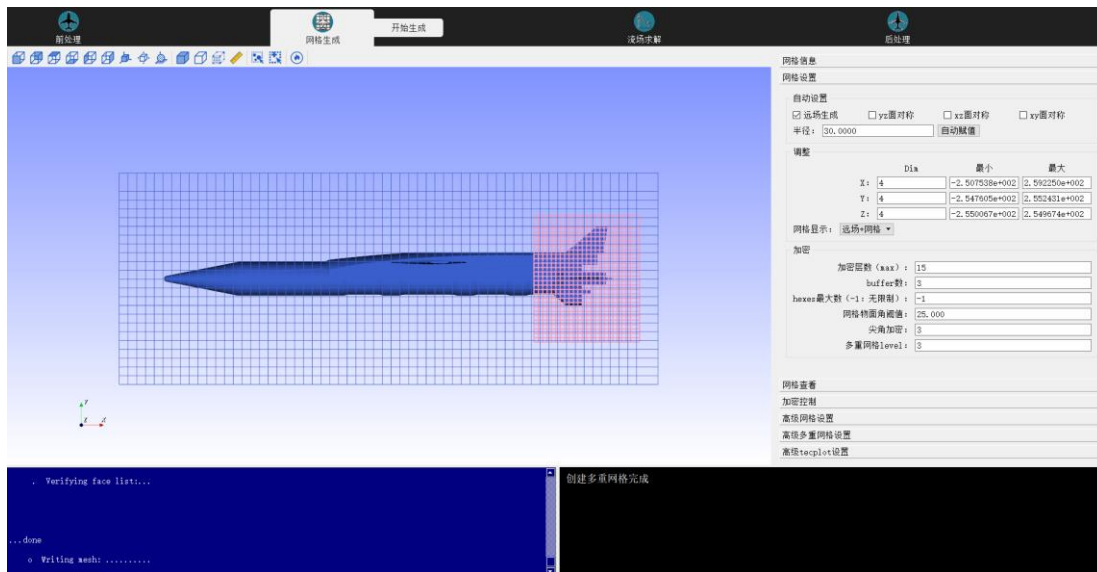


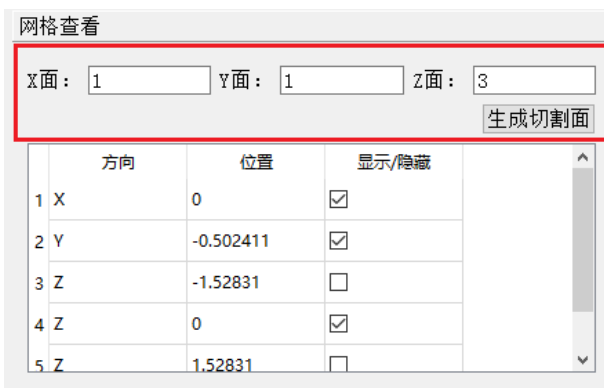
图 25 网格生成运行界面

网格生成之后可以点击网格信息，查看计算网格量，包括壁面网格数目、空间六面体网格量等，见图 26，常规布局外形“六面体个数”控制在 200 万-300 万即可，复杂外形需要在 500 万以上。

网格信息	
六面体个数：	2418952
最大加密等级：	18
最小加密等级：	12
壁面网格数目：	1003927
切割单元数目：	319321

图 26 网格信息

用户可以在“网格查看”里生成空间截面网格，设置方法见图 27，通常设置 z 为 3，点击“生成切割面”，即可生成截面网格。



(旧底图登记号)
(底图登记号)

					RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)		第 17 页	

软盘编号	
CAD	图 27 空间截面网格生成设置
	软件可以同时显示物面网格与截面网格分布，见图 28，用户可以查看空间网格与物面网格的尺度匹配情况。

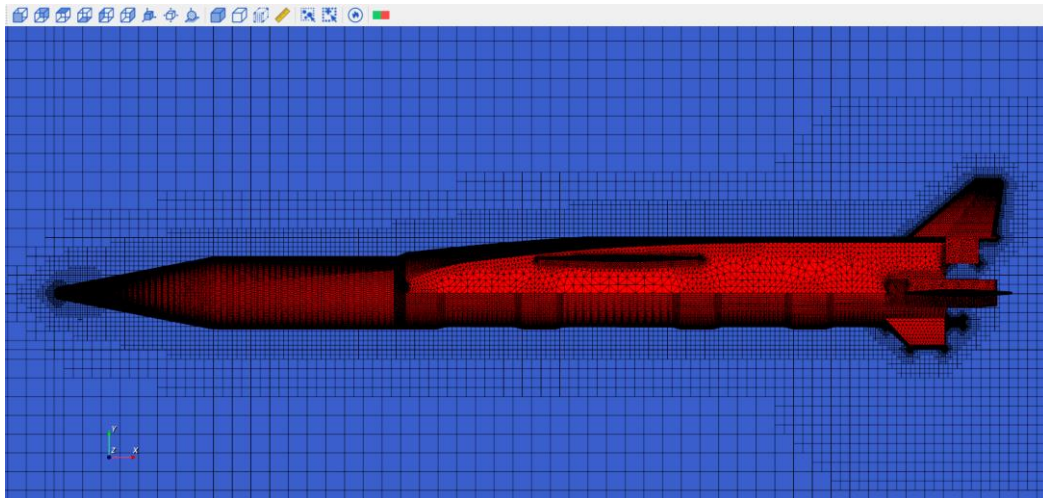


图 28 空间截面网格与物面网格显示

3.5 流场求解

流场求解界面见图 29，主要包括求解器参数设置窗口以及残差监控窗口，用户需要对“参考值”、“飞行条件”和“求解器”进行设置。

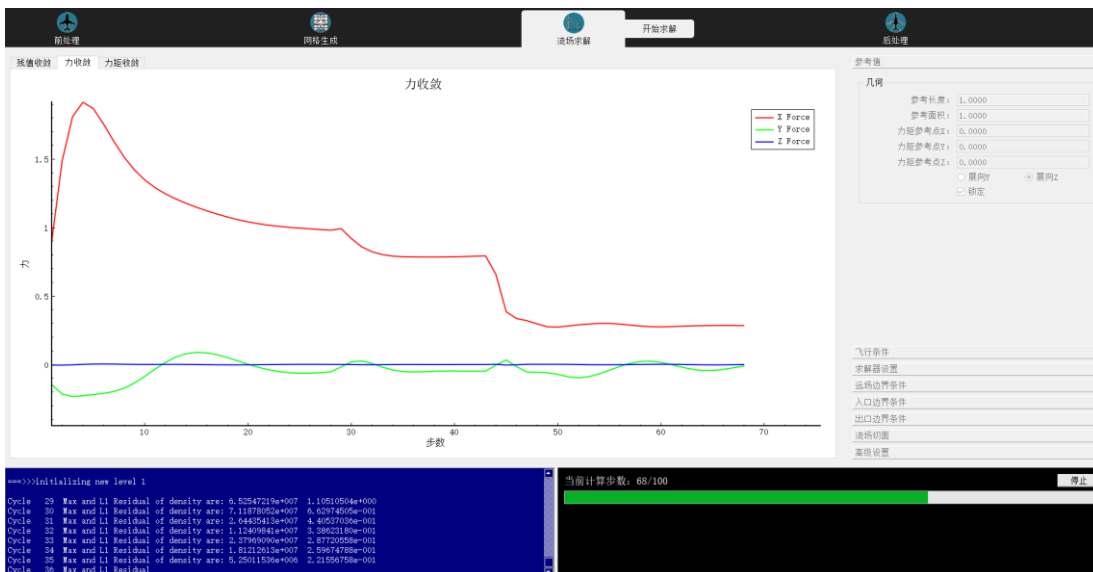



图 29 流场求解界面

参考值包括参考长度、参考面积以及矩心点，见图 30，另外用户可以选择飞行器展向是沿 y 方向还是 z 方向，这直接决定攻角的设定及气动系数，按照约定坐标系默认 z 为展向。

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
				第 18 页	

软盘编号				
CAD				
	<div data-bbox="604 132 1190 486" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="762 512 1038 544">图 30 参考值设置选项</p> <p data-bbox="263 560 1458 656">由于求解器基于 Euler 方程,所以飞行条件只需要输入来流马赫数、攻角及侧滑角;其他参数均保持默认,见图 31。</p> <div data-bbox="596 678 1198 1120" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="751 1149 1051 1180">图 31 飞行条件设置选项</p> <p data-bbox="263 1196 1479 1415">求解器设置选项包括迭代步数、CFL 数、通量格式和限制器,见图 32,用户可以设定迭代步数为 120 步(注:1. 在求解过程中软件采用多重网格和 openmp 并行技术,所以收敛步数通常在 120 步左右),复杂外形可以设定为 150 步,限制器选择 minmod,其他参数均保持默认即可。</p> <div data-bbox="587 1440 1142 1850" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="762 1881 1038 1912">图 32 求解器设置选项</p>			
(旧底图登记号)				
(底图登记号)				
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	RJ-QD002
				第 19 页
				RJ-QD002SJ009

软盘编号				
	对图 32 中参数进行说明。			
CAD	1) “步数”：计算迭代步数，迭代步应足够大，保证数据收敛。默认值为 100 步，用户可以根据具体情况设置。			
	2) “CFL”：CFD 计算中的 CFL 数，数值越大，收敛越快。但过大的 CFL 数会导致数值发散。一般取 0.9~1.4。默认值为 1.4。			
	3) “多重网格层数”：使用多重网格的层数。层数越多，计算量越大。一般取 3。			
	4) “通量函数”：采用的通量函数格式。包括 VanLeer 格式、VanLeer-Hanel 格式、Collela 格式和 HLLC 格式。具体格式的公式见软件理论手册。不同格式的粘性耗散不同，一般采用 Van Leer (0)。			
	5) “限制器”：限制器的作用是通过控制计算出的解的梯度避免出现非物理震荡。具体格式的公式见软件理论手册。一般采用 MinMod(5)。			
	用户可以通过“流场切面”中截取空间流场，见图，通过“+”设置 X、Y、Z 方向截面的坐标。			
				
	<p style="text-align: center;">图 33 流场切面设置</p>			
	<p>为了增加求解器的鲁棒性，在高级设置里可以勾选“无输出的被切网格梯度”，并设定为 0.8 (0<=该值<=1, 该值越小，稳定性越好，但精度越低)，见图 34。</p>			

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

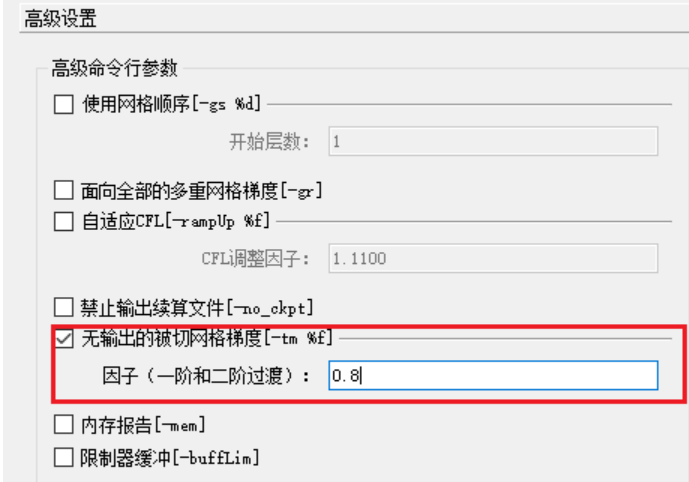
(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 20 页

软盘编号					
CAD					
	<p>图 34 高级设置选项</p> <p>对图 34 参数说明。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) “使用网格顺序”：将使多重网格设置失效，而直接从用户设置的层数网格开始求解。调试阶段使用，建议不勾选。 2) “面向全部的多重网格梯度”：是否针对全部网格使用多重层级。程序在多重网格区域自动适用，建议不勾选。 3) “自适应 CFL”：求解过程中可以自动调整 CFL 数，建议不勾选。 4) “禁止输出续算文件”：不输出 check 文件，该文件为求解过程产生的中间文件，以计算次数为标识，软件已自动处理，建议不勾选。 5) “无输出的被切网格梯度”：物面网格的物理量插值精度设置。1 阶因子=0，2 阶因子=1，因子在[0,1]区间。该值越小，鲁棒性越好，但精度越低。建议取值 0.8。 6) “内存报告”：求解过程中内存使用情况报告，建议不勾选。 7) “限制器缓冲”：求解过程中暂存限制器数据，建议不勾选。 <p>设置完成后，点击“开始求解”，软件启动求解器模块，并监视残差、气动力的收敛情况，用户可以查看气动力是否收敛到某一定值来判断流场收敛情况；如果计算发散，可以降低“CFL 数”及“无输出的被切网格梯度”，如果继续发散，用户需要检查输入的部件是否满足单连通域的要求。</p>				
(旧底图登记号)	<p>用户可以通过 tecplot 打开“1.Aerodynamic”下的“Components.i.dat”物面流场文件，并加载“cutPlanes.dat”截面流场文件，实现物面/截面流场同时显示，见图 35。</p>				
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 21 页	

软盘编号				
CAD				
	<div data-bbox="400 132 1337 663" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="683 689 1059 721">图 35 物面与空间截面流场显示</p> <p data-bbox="268 734 1477 833">流场中的压力值是无量纲的。如果需要将压力系数转换为实际的绝对压力值，需要使用公式：</p> $P_{true} = Pressure * \gamma * P_{\infty}$ <p data-bbox="331 916 1430 949">其中，Pressure 为计算获得的无量纲压力值，γ是气体常数 1.4，P_{∞}为来流压力。</p> <p data-bbox="331 981 663 1014">马赫数计算的公式如下：</p> $Ma = \sqrt{\frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{\gamma Pressure / \rho}}$ <p data-bbox="268 1193 620 1227">3.6 多工况气动扫掠计算</p> <p data-bbox="331 1283 1262 1317">多工况计算在菜单栏“工具->多工况”下启动，界面如图 36 所示。</p> <p data-bbox="268 1346 1477 1503">用户可以输入马赫数序列、攻角序列、侧滑角序列进行扫掠（均以英文逗号隔开），设定参考长度、参考面积、参考点、计算步数、cutcellGrad（默认 0.8）及版本名称（计算结果存放在该名称的文件夹下），“质心系数”用于计算质心处力矩。</p> <p data-bbox="268 1532 1477 1630">点击“开始计算”，会弹出监测过程，计算结果在“1.Aerodynamic/版本名称”路径下。</p> <p data-bbox="331 1659 1318 1693">完成计算之后，点击“数据处理”，软件会处理各工况下的气动六分量。</p>			
(旧底图登记号)	<p data-bbox="331 1720 1477 1753">点击“粘性修正”，软件会批量化对各工况进行气动摩阻修正，注意修正之后需要</p>			
	<p data-bbox="268 1783 730 1816">点击“数据处理”更新气动方表。</p>			
(底图登记号)				
				RJ-QD002
				RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 22 页

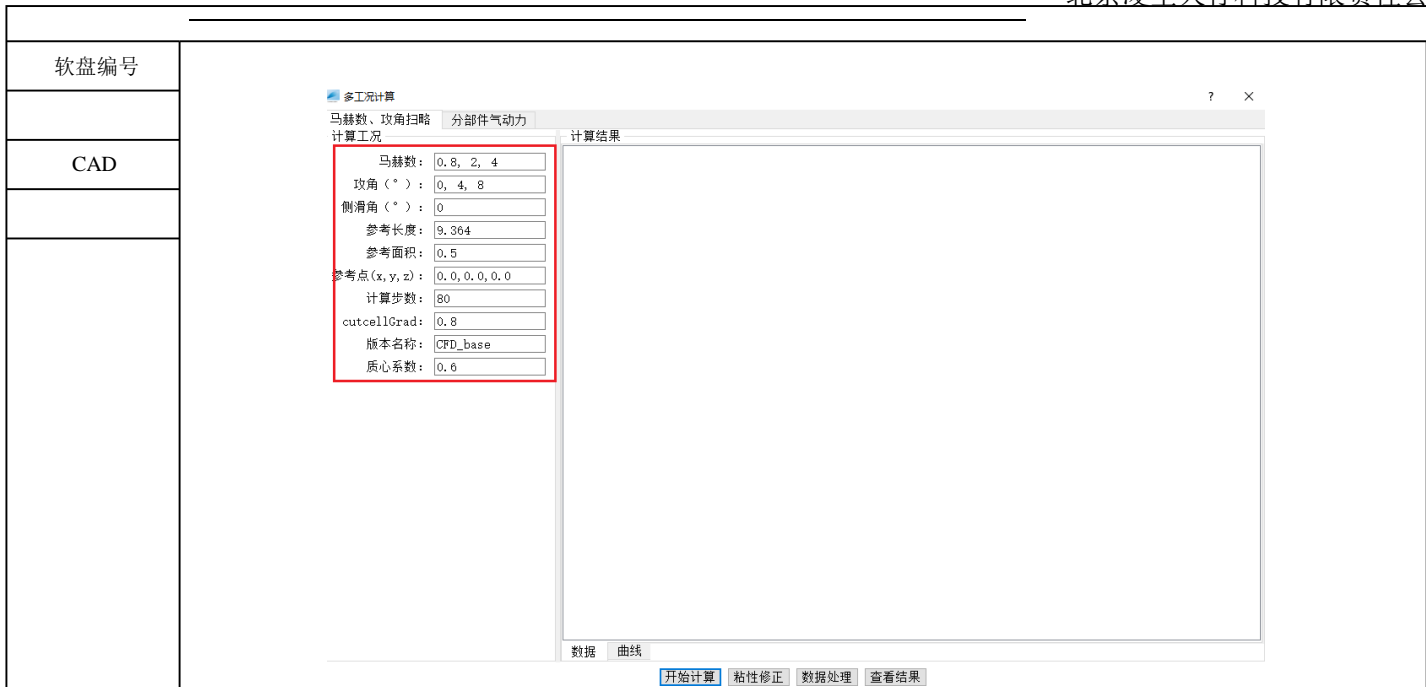


图 36 多工况计算页面

点击“查看结果”，在后侧显示气动六分量方表，见图 37，beta 代表侧滑角，Ma 代表马赫数，alpha 代表攻角，CA 代表轴向力系数，CN 代表法向系数，CZ 代表侧向力系数，Cl、Cn 和 Cm 为体轴系 x、y 和 z 方向力矩，CD 为阻力系数，CL 为升力系数，k 为升阻比，Xcp 为压心位置，Cm_Centroid 为质心处力矩，也可查看“曲线”，显示不同马赫数下，各气动变量随攻角的变化情况，见图 38。

计算结果														
	beta	Ma	alpha	CA	CN	CZ	Cl	Cn	Cm	CD	CL	k	Xcp	Cm_centroid
1	0.0	0.8	0.0	4.931091E-01	7.567088E-03	-5.002637E...	1.321388E-04	-7.440670E...	9.947697E-03	4.931091E-01	7.567088E-03	1.534567E-02	-1.314600E...	1.448795E-02
2	0.0	0.8	4.0	4.666548E-01	1.757584E+...	-5.777155E...	-2.027988E...	-5.287387E...	-9.051003E...	5.881209E-01	1.720750E+...	2.925844E+...	5.149685E-01	1.494500E-01
3	0.0	0.8	8.0	4.214352E-01	3.671696E+...	2.782552E-03	2.730800E-04	1.885164E-03	-1.923582E...	9.283351E-01	3.577311E+...	3.853469E+...	5.238947E-01	2.794356E-01
4	0.0	2.0	0.0	9.403168E-01	1.560208E-01	-9.048671E...	-1.083637E...	-6.605030E...	-1.809651E...	9.403168E-01	1.560208E-01	1.659236E-01	1.159878E+...	-8.735263E...
5	0.0	2.0	4.0	9.564207E-01	1.540900E+...	-4.524791E...	-2.265128E...	-4.184793E...	-9.658678E...	1.061579E+...	1.470429E+...	1.385135E+...	6.268207E-01	-4.132806E...
6	0.0	2.0	8.0	9.831764E-01	2.944013E+...	-2.410918E...	-1.930403E...	-2.676998E...	-1.755034E...	1.383336E+...	2.778530E+...	2.008573E+...	5.961366E-01	1.137383E-02
7	0.0	4.0	0.0	6.079292E-01	8.016071E-02	4.016668E-04	-6.704577E...	3.133397E-04	-1.049788E...	6.079292E-01	8.016071E-02	1.318586E-01	1.309604E+...	-5.688236E...
8	0.0	4.0	4.0	6.358379E-01	8.374184E-01	2.599415E-04	-4.971629E...	-2.714920E...	-5.131571E...	6.927043E-01	7.910247E-01	1.141937E+...	6.127845E-01	-1.070602E...
9	0.0	4.0	8.0	6.625250E-01	1.655546E+...	4.293526E-04	3.900508E-05	9.499023E-05	-9.510920E...	8.864848E-01	1.547228E+...	1.745352E+...	5.744886E-01	4.223529E-02

图 37 多工况处理结果文件说明

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

软盘编号	
CAD	

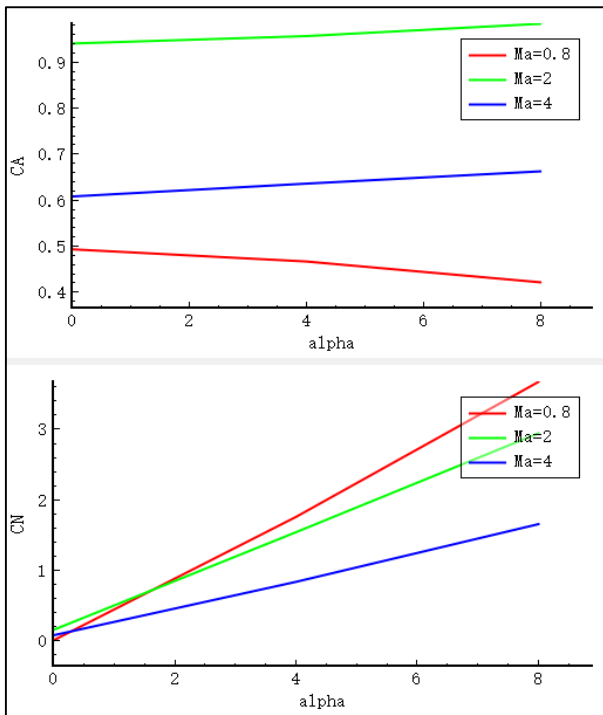


图 38 不同马赫数下气动变量随攻角变化情况

3.7 分部件气动载荷

“分部件气动力”在菜单栏“工具->多工况”下启动，界面如图 39 所示，可以批量化提取分部件气动六分量、铰链力矩、底阻等信息。

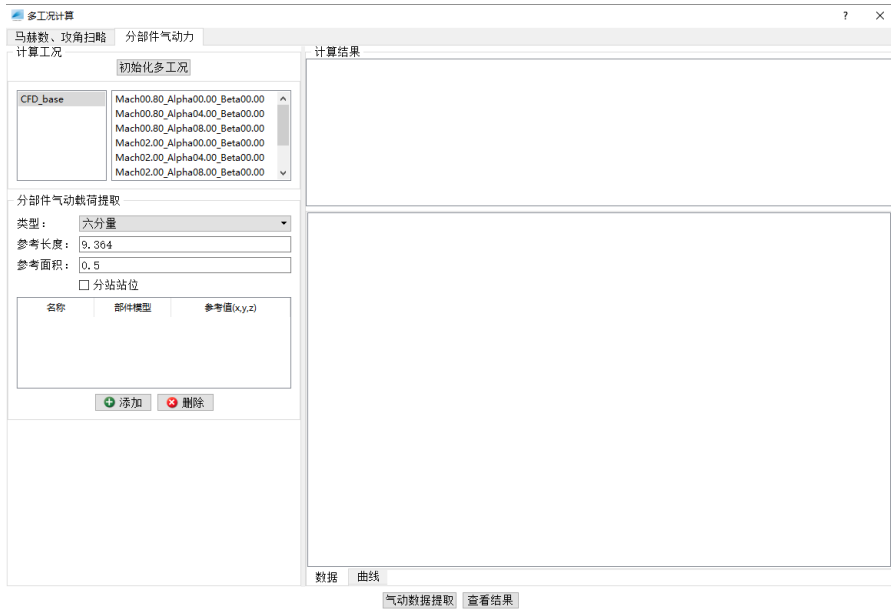


图 39 分部件气动力提取界面

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
				第 24 页	

软盘编号

3.7.1 分部件气动六分量

CAD

单击“分部件气动力”栏，单击“初始化多工况”，可以看到多工况计算的算例（注意，这些工况应由多工况全部计算完成，避免有空文件夹造成程序异常）。

设置分部件气动载荷提取参数中，类型设为“六分量”，设置参考长度、参考面积、力矩参考点，添加部件模型，导入分部件的 stl 格式网格文件，注意分部件的 stl 网格与气动计算全箭的网格保持对应关系，点击“气动数据提取”，开始批量计算各分部件的气动六分量。

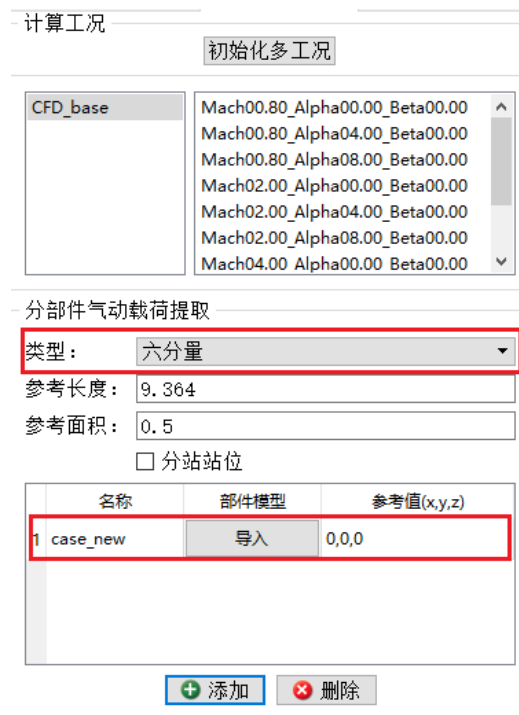


图 40 分部件气动载荷参数设置

计算结果如图 41 所示。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 25 页

软盘编号	
CAD	

计算结果
case_new.force_moment.dat

	beta	Mach	alpha	CA	CN	CZ	Cl	Cn	Cm
1	0.0	0.8	0.0	0.013828	0.006763	-0.000533	-0.000060	-0.000511	-0.004978
2	0.0	0.8	4.0	0.013716	0.007013	-0.002755	-0.000229	-0.002430	-0.005177
3	0.0	0.8	8.0	0.013532	0.007695	0.000688	0.000019	0.000529	-0.005779
4	0.0	2.0	0.0	0.018495	-0.011727	-0.000190	-0.000014	-0.000166	0.011347
5	0.0	2.0	4.0	0.017407	-0.011156	-0.000349	-0.000028	-0.000306	0.010778
6	0.0	2.0	8.0	0.017033	-0.011069	-0.000036	-0.000006	-0.000034	0.010693
7	0.0	4.0	0.0	0.012436	-0.011853	-0.000222	-0.000017	-0.000191	0.011026
8	0.0	4.0	4.0	0.010123	-0.008903	-0.000076	-0.000008	-0.000067	0.008335
9	0.0	4.0	8.0	0.009235	-0.007842	0.0000240	0.000015	0.000203	0.007367

图 41 分部件气动六分量计算结果

3.7.2 舵铰链力矩

分部件载荷类型选择“铰链力矩”，部件模型导入舵的 stl 模型，注意分部件的 stl 网格与气动计算全箭的网格保持对应关系，这时参考值需要设置两个点坐标，由 2 点确定舵的旋转轴，方向指向飞行器外侧，见图 42，舵偏转角度由右手法则指向飞行器外法向为正，点击“气动数据提取”开始计算。

初始化多工况

CFD_base

- Mach00.80_Alpha00.00_Beta00.00
- Mach00.80_Alpha04.00_Beta00.00
- Mach00.80_Alpha08.00_Beta00.00
- Mach02.00_Alpha00.00_Beta00.00
- Mach02.00_Alpha04.00_Beta00.00
- Mach02.00_Alpha08.00_Beta00.00
- Mach04.00_Alpha00.00_Beta00.00
- Mach04.00_Alpha04.00_Beta00.00
- Mach04.00_Alpha08.00_Beta00.00

分部件气动载荷提取

类型：铰链力矩

参考长度：

参考面积：

名称	部件模型	参考值(x,y,z)	参考值(x,y,z)
1 duo1	导入	8.2, 0, 0	8.2, -1, 1
2 duo2	导入	8.2, 0, 0	8.2, 1, 1
3 duo3	导入	8.2, 0, 0	8.2, 1, -1
4 duo4	导入	8.2, 0, 0	8.2, -1, -1

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 26 页	

软盘编号

CAD

图 42 铰链力矩参数设置

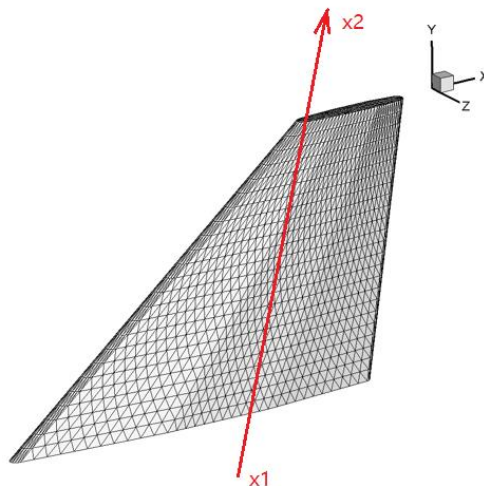


图 43 舵部件表面网格

可以点击“查看结果”，可以查看每个舵的铰链力矩，见图 44。

计算结果				
duo1.axisMoment.dat				
duo2.axisMoment.dat				
duo3.axisMoment.dat				
duo4.axisMoment.dat				
	beta	Mach	alpha	Cm_axis
1	0.0	0.8	0.0	-0.000056
2	0.0	0.8	4.0	-0.000076
3	0.0	0.8	8.0	-0.000059
4	0.0	2.0	0.0	-0.000004
5	0.0	2.0	4.0	-0.000007
6	0.0	2.0	8.0	-0.000004
7	0.0	4.0	0.0	-0.000001
8	0.0	4.0	4.0	-0.000002
9	0.0	4.0	8.0	-0.000002

图 44 铰链力矩结果

3.7.3 底阻

分部件气动力类型选择“底阻”。点击“添加”，导入发动机喷管出口的 stl 网格模型，点击“开始计算”。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

软盘编号	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">计算工况</p> <p style="text-align: center;">初始化多工况</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%; text-align: center;">CFD_base</td> <td> Mach00.80_Alpha00.00_Beta00.00 Mach00.80_Alpha04.00_Beta00.00 Mach00.80_Alpha08.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha00.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha04.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha08.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha00.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha04.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha08.00_Beta00.00 </td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">分部件气动载荷提取</p> <p>类型: 底阻</p> <p>参考长度: <input type="text" value="9.364"/></p> <p>参考面积: <input type="text" value="0.5"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">名称</th> <th>部件模型</th> </tr> </thead> <tbody> <tr style="border: 1px solid red;"> <td>1 dizu</td> <td>导入</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"> <input type="button" value="+ 添加"/> <input type="button" value="x 删除"/> </p> </div>	CFD_base	Mach00.80_Alpha00.00_Beta00.00 Mach00.80_Alpha04.00_Beta00.00 Mach00.80_Alpha08.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha00.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha04.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha08.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha00.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha04.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha08.00_Beta00.00	名称	部件模型	1 dizu	导入
CFD_base		Mach00.80_Alpha00.00_Beta00.00 Mach00.80_Alpha04.00_Beta00.00 Mach00.80_Alpha08.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha00.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha04.00_Beta00.00 Mach02.00_Alpha08.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha00.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha04.00_Beta00.00 Mach04.00_Alpha08.00_Beta00.00					
名称		部件模型					
1 dizu		导入					
CAD							
(旧底图登记号)							
(底图登记号)							

图 45 底阻参数设置示意图

可以点击“查看结果”，也可以直接打开结果文件“1.Aerodynamic**\case_new.dizu.dat”。结果文件中参数包括侧滑角 beta、马赫数 Mach、攻角 alpha 和底阻。

计算结果				
dizu.dizu.dat				
	beta	Mach	alpha	dizu
1	0.0	0.8	0.0	-0.133754
2	0.0	0.8	4.0	-0.135196
3	0.0	0.8	8.0	-0.143667
4	0.0	2.0	0.0	-0.175940
5	0.0	2.0	4.0	-0.178670
6	0.0	2.0	8.0	-0.182875
7	0.0	4.0	0.0	-0.061407
8	0.0	4.0	4.0	-0.061464
9	0.0	4.0	8.0	-0.061319

图 46 底阻结果示意图

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 28 页	

软盘编号

3.8 气动热求解模块

CAD

气动热求解包括单工况计算和沿飞行弹道计算两部分。

3.8.1 单工况热流计算

单击“后处理”，选择“热流计算”，进行单工况的热流计算，界面如图 47。

设置来流静温、壁面温度、流动模型和气体模型参数，添加测点。设置测点坐标，可以直接在模型表面选点，也可以通过文件导入测点坐标。

气体模型的选择说明：理想气体适用于温度小于 800K 时的热流计算， γ 取 1.4 常数值；当温度大于 800K 时，选择“热平衡气体”，气体的定压比热容 C_p 和定容比热容 C_v 以及 γ 是温度函数。沿弹道计算时，建议取“热平衡气体”，其适用范围比理想气体更大。

流动模型说明：在高超声速条件下，湍流模型计算获得的表面热流是层流计算结果的 3-5 倍。

名称	截取位置	测点
1 probes_zhuiduan	0.0001	设置

图 47 单工况热流计算示意图

热流测点添加可以点击设置按钮，进入如下界面，见图 48，用户可以点击添加按钮，按住左键在飞行器上布置测点范围和总数（布置之前需要将飞行器调整到合适的角度），也可以导入测点坐标文件。

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 29 页

软盘编号
CAD

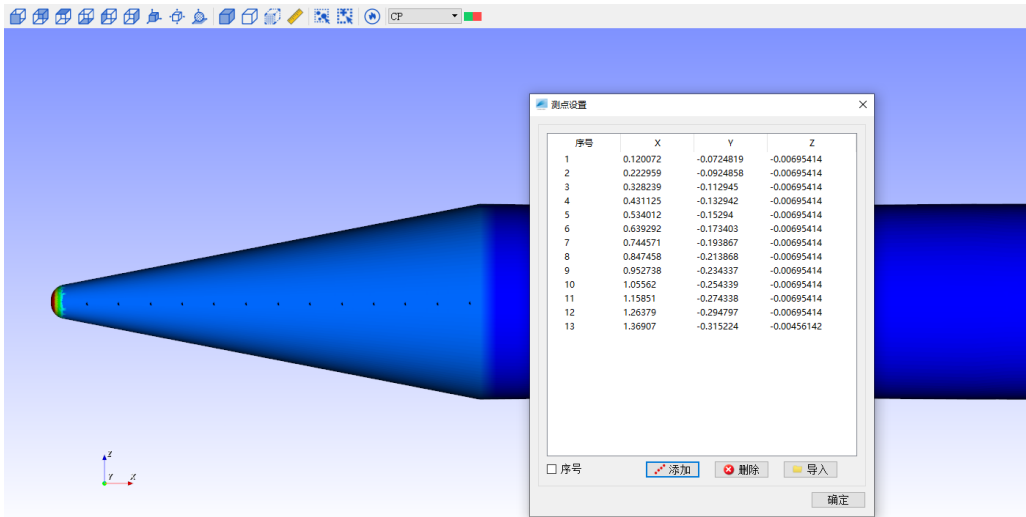


图 48 设置热流测点

测点名称格式“probes_***.dat”。文件中每行 3 个浮点型数据表示点的 x,y,z 坐标。注意，应确保测点在物面上。如果测点距离物面偏差较大，会导致计算失败。格式如图 49。



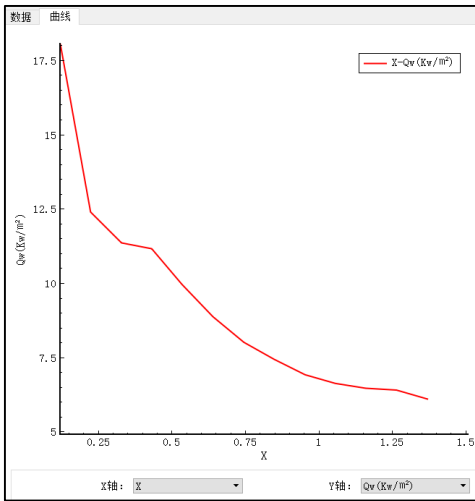
图 49 测点文件示意图

可以通过查看结果按钮，查看各点的热流，也可以在文件夹 1.Aerodynamic 下，直接查看结果文件“Qw_probes_***.dat”。文件中包含坐标、压力、恢复焓和热流值。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)		

软盘编号																																																																																																						
CAD																																																																																																						
	<div style="text-align: center;"> 数据 曲线 </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> <th>P(Pa)</th> <th>Hr(KJ/kg)</th> <th>Qw(Kw/m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.120072</td><td>-0.072482</td><td>-0.006954</td><td>5500.36</td><td>958.546</td><td>18.0549</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.222959</td><td>-0.092486</td><td>-0.006954</td><td>5763.58</td><td>958.882</td><td>12.4001</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.328239</td><td>-0.112945</td><td>-0.006954</td><td>5851.14</td><td>958.872</td><td>11.3615</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.431125</td><td>-0.132942</td><td>-0.006954</td><td>5886.38</td><td>958.644</td><td>11.1649</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.534012</td><td>-0.15294</td><td>-0.006954</td><td>5910.88</td><td>958.462</td><td>9.96373</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.639292</td><td>-0.173403</td><td>-0.006954</td><td>5975.72</td><td>958.175</td><td>8.87735</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.744571</td><td>-0.193867</td><td>-0.006954</td><td>5974.55</td><td>958.038</td><td>8.01635</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.847458</td><td>-0.213868</td><td>-0.006954</td><td>5976.37</td><td>957.897</td><td>7.44419</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.952738</td><td>-0.234337</td><td>-0.006954</td><td>5986.92</td><td>957.836</td><td>6.92498</td></tr> <tr><td>10</td><td>1.05562</td><td>-0.254339</td><td>-0.006954</td><td>5990.78</td><td>957.747</td><td>6.63348</td></tr> <tr><td>11</td><td>1.15851</td><td>-0.274338</td><td>-0.006954</td><td>5966.49</td><td>957.638</td><td>6.47114</td></tr> <tr><td>12</td><td>1.26379</td><td>-0.294797</td><td>-0.006954</td><td>5985.25</td><td>957.58</td><td>6.40847</td></tr> <tr><td>13</td><td>1.36907</td><td>-0.315224</td><td>-0.004561</td><td>5490.14</td><td>956.613</td><td>6.10753</td></tr> </tbody> </table>					X	Y	Z	P(Pa)	Hr(KJ/kg)	Qw(Kw/m²)	1	0.120072	-0.072482	-0.006954	5500.36	958.546	18.0549	2	0.222959	-0.092486	-0.006954	5763.58	958.882	12.4001	3	0.328239	-0.112945	-0.006954	5851.14	958.872	11.3615	4	0.431125	-0.132942	-0.006954	5886.38	958.644	11.1649	5	0.534012	-0.15294	-0.006954	5910.88	958.462	9.96373	6	0.639292	-0.173403	-0.006954	5975.72	958.175	8.87735	7	0.744571	-0.193867	-0.006954	5974.55	958.038	8.01635	8	0.847458	-0.213868	-0.006954	5976.37	957.897	7.44419	9	0.952738	-0.234337	-0.006954	5986.92	957.836	6.92498	10	1.05562	-0.254339	-0.006954	5990.78	957.747	6.63348	11	1.15851	-0.274338	-0.006954	5966.49	957.638	6.47114	12	1.26379	-0.294797	-0.006954	5985.25	957.58	6.40847	13	1.36907	-0.315224	-0.004561	5490.14	956.613	6.10753
	X	Y	Z	P(Pa)	Hr(KJ/kg)	Qw(Kw/m²)																																																																																																
1	0.120072	-0.072482	-0.006954	5500.36	958.546	18.0549																																																																																																
2	0.222959	-0.092486	-0.006954	5763.58	958.882	12.4001																																																																																																
3	0.328239	-0.112945	-0.006954	5851.14	958.872	11.3615																																																																																																
4	0.431125	-0.132942	-0.006954	5886.38	958.644	11.1649																																																																																																
5	0.534012	-0.15294	-0.006954	5910.88	958.462	9.96373																																																																																																
6	0.639292	-0.173403	-0.006954	5975.72	958.175	8.87735																																																																																																
7	0.744571	-0.193867	-0.006954	5974.55	958.038	8.01635																																																																																																
8	0.847458	-0.213868	-0.006954	5976.37	957.897	7.44419																																																																																																
9	0.952738	-0.234337	-0.006954	5986.92	957.836	6.92498																																																																																																
10	1.05562	-0.254339	-0.006954	5990.78	957.747	6.63348																																																																																																
11	1.15851	-0.274338	-0.006954	5966.49	957.638	6.47114																																																																																																
12	1.26379	-0.294797	-0.006954	5985.25	957.58	6.40847																																																																																																
13	1.36907	-0.315224	-0.004561	5490.14	956.613	6.10753																																																																																																
	<p>图 50 单工况热流计算结果示意图</p> 																																																																																																					
	<p>图 51 测点热流结果</p>																																																																																																					

3.8.2 沿弹道热流计算

3.8.2.1 弹道稀疏

原始弹道时间间隔较小，通常为 500ms，如果计算所有弹道点计算量过大。首先需要对弹道点进行稀疏处理，根据飞行马赫数、高度、攻角随时间变化进行处理，稀疏后弹道写入 trajectory_diluting.dat 文件。在 2.Trajectory 文件夹下放入该弹道数据文件。

“trajectory_diluting.dat”中保存的弹道点为典型特征点，如马赫数、攻角变化较大处多选取一些点，建议不要超过 50 个工况，文件格式如图 53 所示，每列分别代表：**时间 (s)**、**高度 (m)**、**速度 (m/s)**、**马赫数**、**动压 (Pa)**、**攻角 (°)** 和 **侧滑角 (°)**。注意，数据结尾不能有多余空行，数据需要从第二行开始输入（第一行为表头，不做处理）。

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 31 页	

软盘编号
CAD

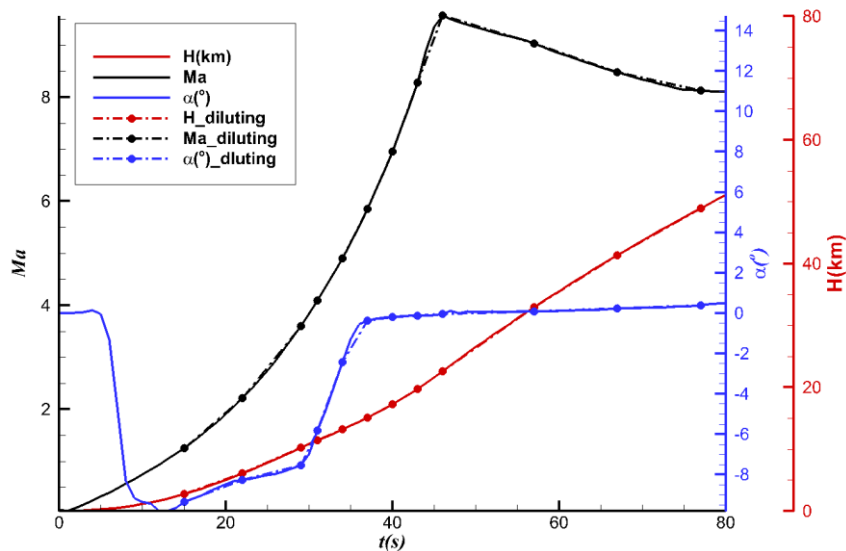


图 52 飞行弹道稀疏示意图

1	time [s]	H [m]	V [m/s]	Ma [-]	Q [Pa]	alpha [deg]	beta [deg]
2	11.58	3087.14	395.53	1.21	70489.20	0.00	0.00
3	30.30	11019.55	691.73	2.34	63584.30	0.00	0.00
4	41.45	18399.75	1033.6	3.48	32333.79	0.00	0.00
5	54.90	26381.20	908.82	2.94	3295.67	0.00	0.00
6	70.90	33437.43	754.96	2.29	355.38	0.00	0.00
7	91.30	50483.92	564.00	1.81	40.88	0.00	0.00

图 53 稀疏弹道文件格式示意图

注意，当马赫数小于 1.2 时气动热效应较小，可以忽略。对于马赫数 Ma 小于 1.2 的弹道离散点可以剔除，保证离散点的马赫数 Ma 大于 1.2。

3.8.2.2 无粘流场计算

单击“导入弹道”文件，选择 2.Trajectory 路径下准备好的稀疏弹道文件 trajectory_diluting.dat，设定“计算步数”和“cutcellGrad”，保持默认即可，点击“流场计算”按钮，软件会自动沿飞行弹道计算各工况下的 Euler 流场，计算完成后，用户可以选中任意工况名称，并点击“显示流场”，可以查看物面流场云图。



(旧底图登记号)
(底图登记号)

软盘编号

图 54 沿弹道进行 Euler 流场计算

CAD

3.8.2.3 测点热环境计算

目前软件支持散点热流提取，用户可以输入测点的坐标，软件自动化提取相应坐标点的热流密度。气动热计算模块界面见图 55，主要设定参数包括来流静压、来流静温以及壁面温度，可以选择流动模型及气体模型；用户可以点击添加按钮导入测点，新增的测点文件，需要定义名称（名称必须以“probes_”开头，后接测点所在的舱段名称）、截取位置（后面做说明）。

参考值
力和力矩
部件力
切面
粘性力
热流计算
热流计算(沿飞行弹道)
壁面温度 (K): 300
模型缩放: 米
流动模型: 湍流
气体模型: 热平衡气体
驻点区

图 55 气动热计算设置选项

分为驻点区和非驻点区，驻点区输入曲率半径，非驻点区输入名称、流线截断位置和测点坐标。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 33 页

软盘编号	
CAD	

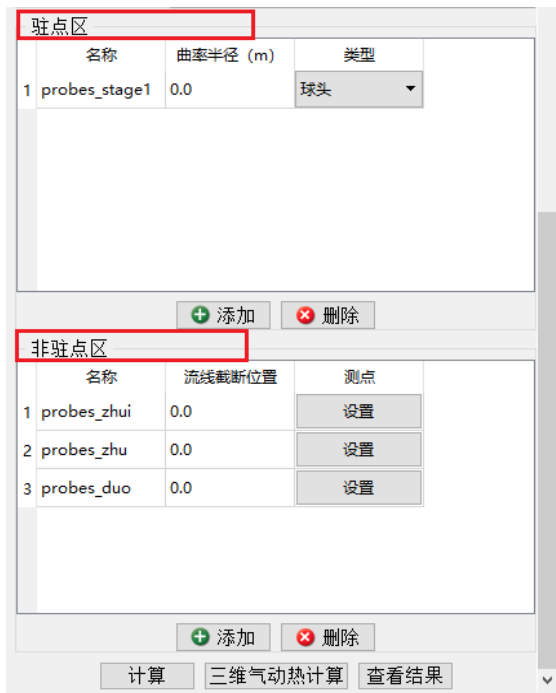


图 56 设置驻点区和非驻点区测点坐标

热流测点设置可以根据压力云图分布情况进行测点布置，见图 57，选取各舱段典型特征点，使测点可以反映舱段的最高热流和整体热流情况。各舱段可以命名为不同的文件名称（均以 probes_开头），计算结果存放在 5.ATM 文件夹下，热流测点结果均放在各自命名的文件夹下。

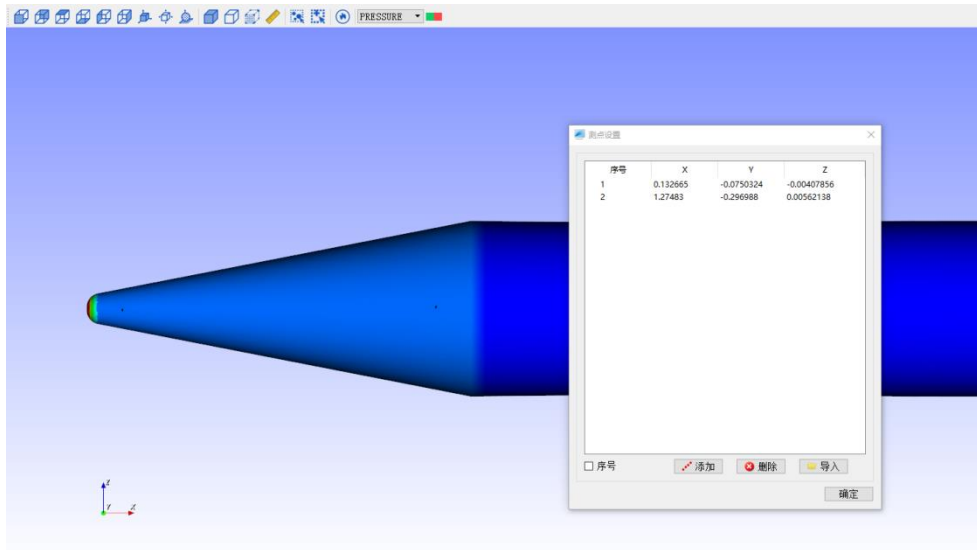


图 57 舱段热流测点选取界面示意图

可以查看各舱段部件测点的热流、恢复焓、压力随时间的变化情况

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 34 页	

软盘编号

CAD

设置完成之后，点击计算按钮启动热流计算模块，计算结束后会在右下黑色视窗中给出提示。用户可以点击查看结果，显示热流随坐标点的变化情况。图片可以导出。在目录“5.ATM”文件夹内存储了各测点的热流和压力等数据信息文件，用户可以根据项目自身需求通过 tecplot 等第三方软件处理数据。

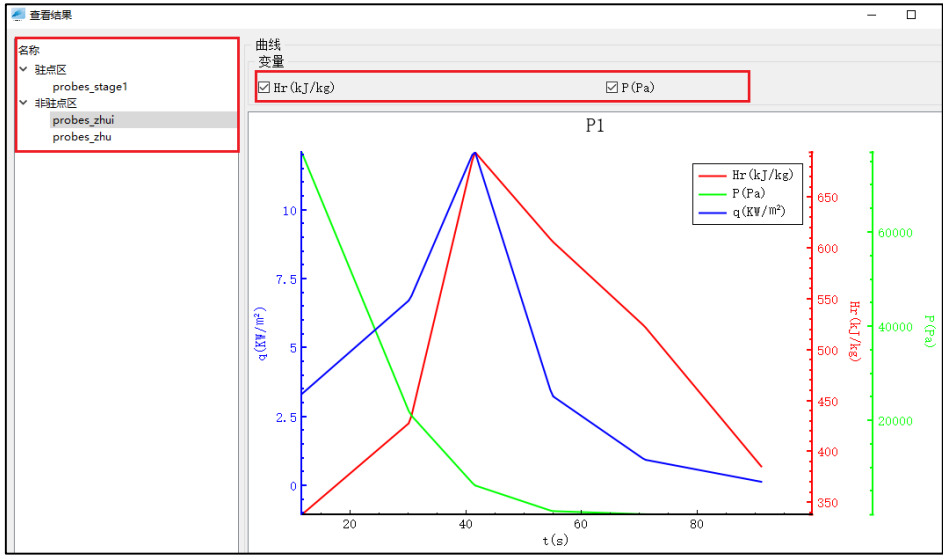


图 58 热流结果示意图

3.8.2.4 三维热环境计算

点击“三维气动热计算”按钮，如图 59 所示，开始计算模型表面热流。在“5.ATM\T00...”工况文件下，生成 Component.v.plt 结果文件。可以通过 tecplot 打开查看热流结果。如图 60 所示。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 35 页	

软盘编号	
CAD	

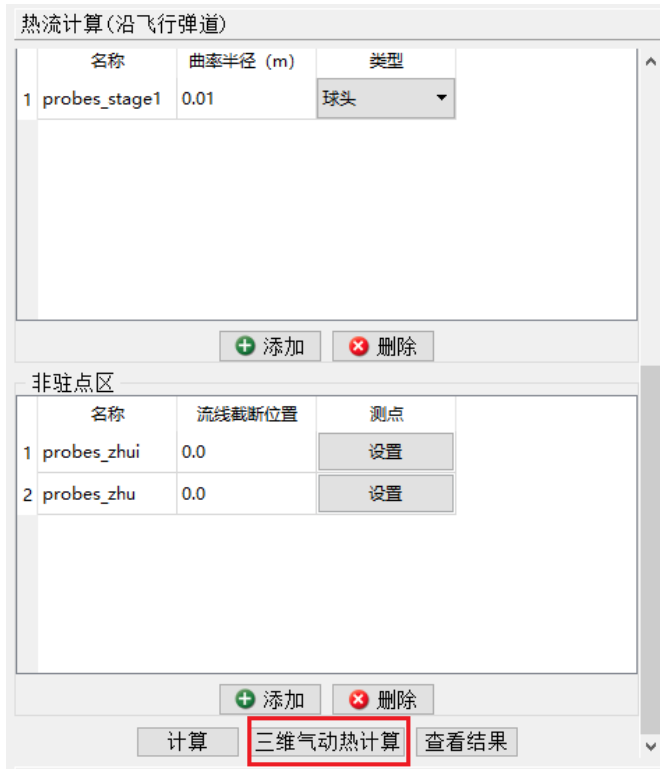


图 59 三维气动热计算

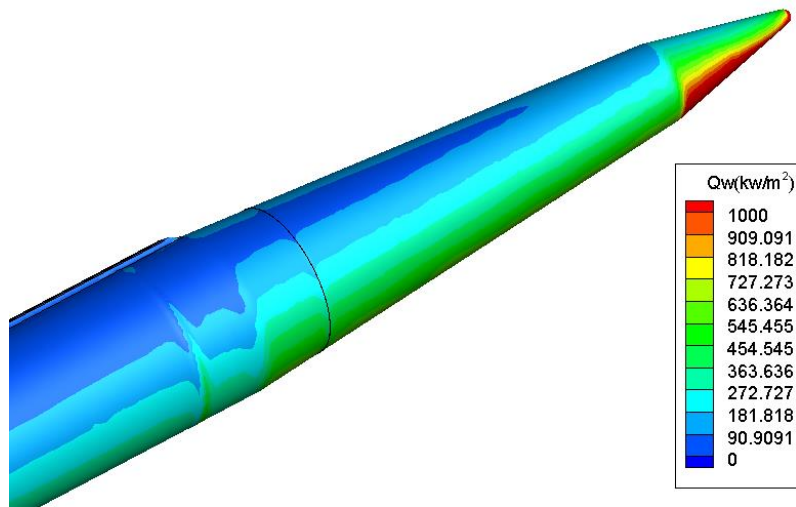


图 60 三维热流云图分布示意图

3.9 一维热响应计算

一维热响应的计算流程如图 61 所示。在计算一维测点温度前，需要完成测点沿弹道的热流计算步骤，获得驻点和测点的热流数据。然后设置材料厚度等参数，开始计算，获得测点沿弹道温度信息。

(旧底图登记号)
(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 36 页	

软盘编号	
CAD	

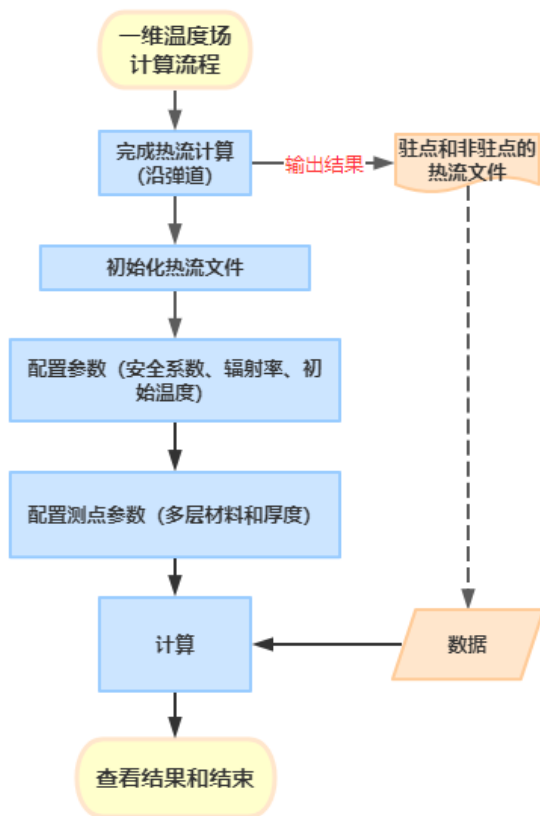


图 61 一维温度场计算流程图

3.9.1 材料库管理

GoHeat-vx 软件目录“execute\database”路径下，存放了所有的材料物性。用户可以根据现有格式，创建新的材料文件（文件名称不能重复，仅支持英文）放在该路径下，包括该材料在某温度下的密度、比热容和导热率。

文件名	↑扩展名	大小	日期	属性
[.]	<DIR>		2022/03/03 23:03	----
1Cr17Ni2	csv	295	2021/03/05 10:50	-a--
WS-02	csv	127	2021/01/28 12:51	-a--
WS-05	csv	127	2021/04/25 10:18	-a--
WS-06	csv	127	2021/04/25 10:20	-a--
ZL114A	csv	125	2021/01/28 09:54	-a--

图 62 材料库

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 37 页	

软盘编号																										
CAD																										
	<table border="1"> <tr> <td>温度℃ (密度)</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>密度kg/m³</td> <td>2685</td> </tr> <tr> <td>温度℃ (比热容)</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>比热容J/(kg·K)</td> <td>963</td> </tr> <tr> <td>温度℃ (导热率)</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>导热率W/(m·K)</td> <td>152</td> </tr> </table>				温度℃ (密度)	20	密度kg/m ³	2685	温度℃ (比热容)	20	比热容J/(kg·K)	963	温度℃ (导热率)	20	导热率W/(m·K)	152										
温度℃ (密度)	20																									
密度kg/m ³	2685																									
温度℃ (比热容)	20																									
比热容J/(kg·K)	963																									
温度℃ (导热率)	20																									
导热率W/(m·K)	152																									
	<p align="center">图 63 材料物性说明</p> <p>3.9.2 材料辐射率</p> <p>铝合金、不锈钢、模压高硅氧酚醛等材料的热辐射率取决于它们的化学成分、表面处理和温度等因素。下表是它们在一些常见情况下的热辐射率数据。辐射面的位置添加需要根据模型表面、飞行工况和数据需求具体分析。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">材料</th> <th>热辐射率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">铝合金</td> <td>未氧化表面</td> <td>0.05-0.15</td> </tr> <tr> <td>氧化表面</td> <td>0.2-0.4</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">不锈钢</td> <td>未氧化表面</td> <td>0.2-0.4</td> </tr> <tr> <td>氧化表面</td> <td>0.4-0.8</td> </tr> <tr> <td>模压高硅氧酚醛</td> <td>涂层表面</td> <td>0.9-0.95</td> </tr> <tr> <td>氧化锆</td> <td>涂层表面</td> <td>0.2-0.5</td> </tr> <tr> <td>硅基涂层</td> <td>涂层表面</td> <td>0.5-0.8</td> </tr> </tbody> </table> <p>3.9.3 防热方案设计</p> <p>单击 TPS 按钮，初始化热流文件，设置安全系数、辐射率和初始温度，这些系数的设置作用于所有舱段的热响应计算，如图 64。</p>				材料		热辐射率	铝合金	未氧化表面	0.05-0.15	氧化表面	0.2-0.4	不锈钢	未氧化表面	0.2-0.4	氧化表面	0.4-0.8	模压高硅氧酚醛	涂层表面	0.9-0.95	氧化锆	涂层表面	0.2-0.5	硅基涂层	涂层表面	0.5-0.8
材料		热辐射率																								
铝合金	未氧化表面	0.05-0.15																								
	氧化表面	0.2-0.4																								
不锈钢	未氧化表面	0.2-0.4																								
	氧化表面	0.4-0.8																								
模压高硅氧酚醛	涂层表面	0.9-0.95																								
氧化锆	涂层表面	0.2-0.5																								
硅基涂层	涂层表面	0.5-0.8																								
(旧底图登记号)																										
(底图登记号)																										
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	<p align="center">RJ-QD002</p> <p align="center">RJ-QD002SJ009</p> <p align="center">第 38 页</p>																						

软盘编号
CAD

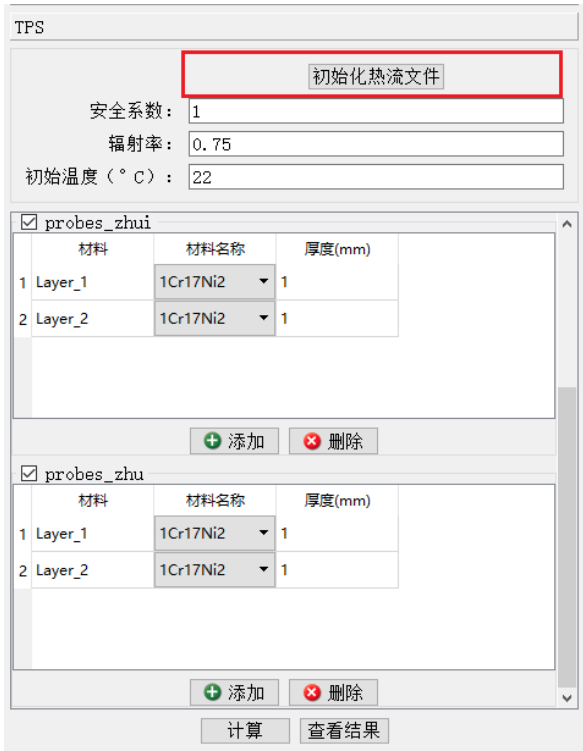


图 64 设置 TPS 参数

软件暂不支持驻点的温度计算。可以在非驻点测点，“由外向内”添加材料，即 Layer_1 为最外层材料，Layer_2 为第二层材料...，设置材料厚度。单击计算，开始计算测点温度。

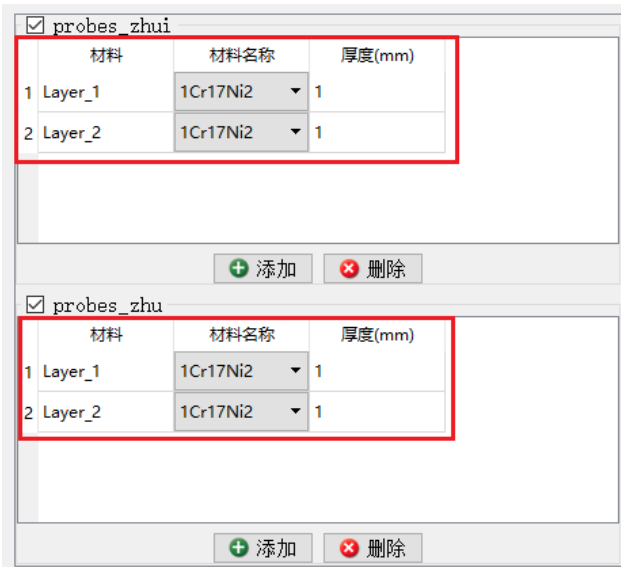


图 65 设置材料和厚度

(旧底图登记号)

(底图登记号)

软盘编号

CAD

可以通过“查看结果”按钮，查看测点不同材料层之间的温度。也可以在“6.Temperature\probes_***\result”路径下查看各测点的结果文件。文件包括时间、各层的温度、冷壁热流和热壁热流值。

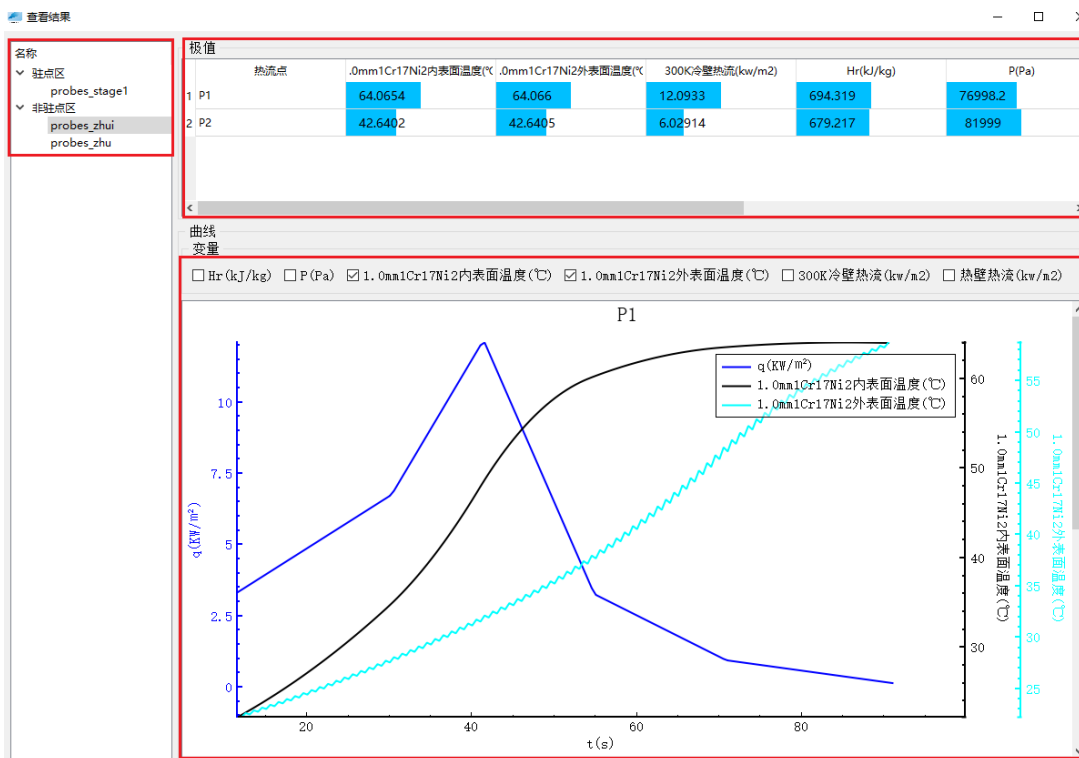


图 66 各材料层温度计算结果

3.10 三维热响应计算

三维表面热流和温度计算需要使用第三方软件 ANSYS。主要流程是添加 ANSYS 瞬态热模块，导入模型、绘制网格、导入已获得的物面物理量结果和设置求解参数，最后通过求解获得三维物面温度信息。注意，三维气动热计算必须在单点热计算完成之后进行。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

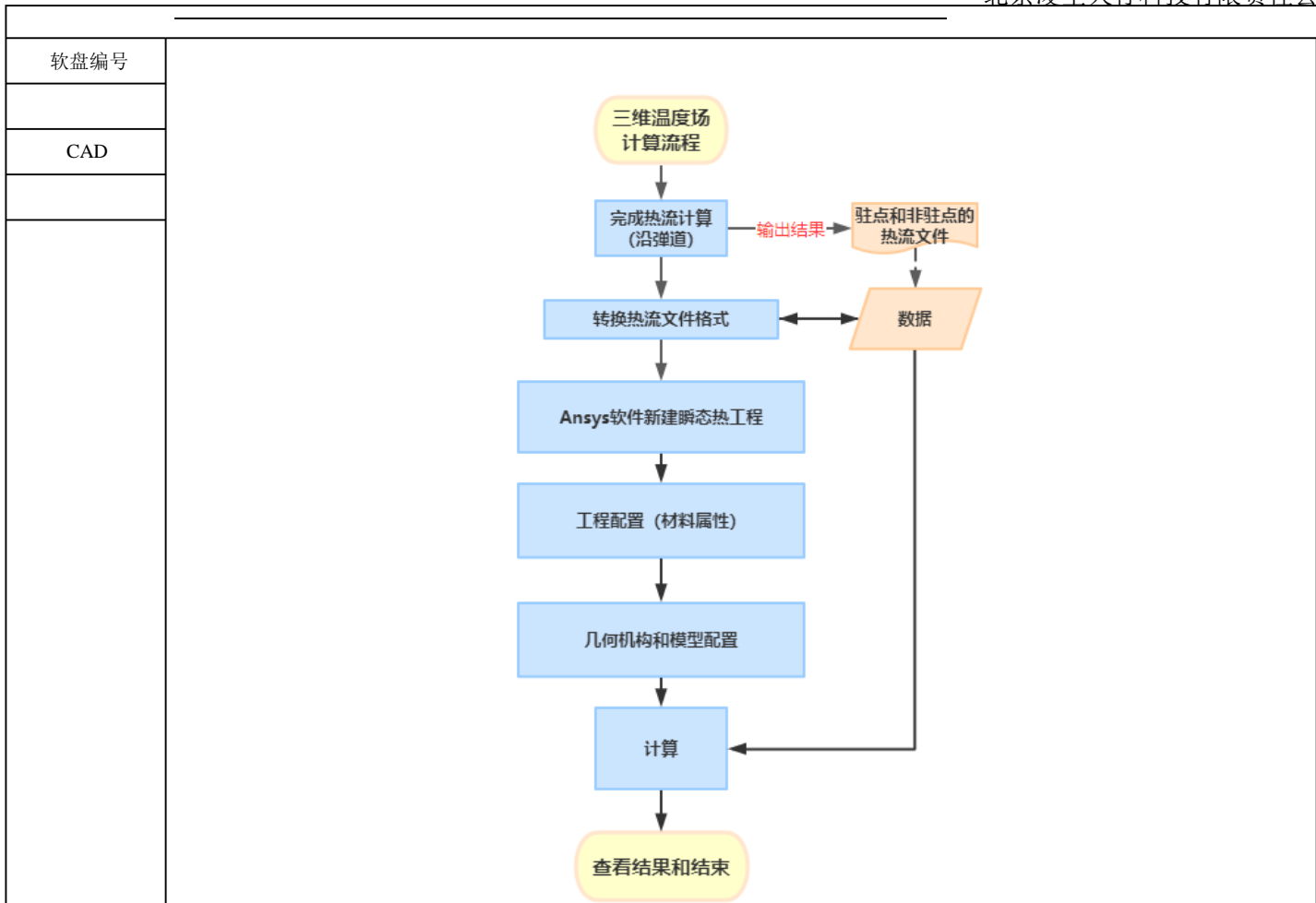
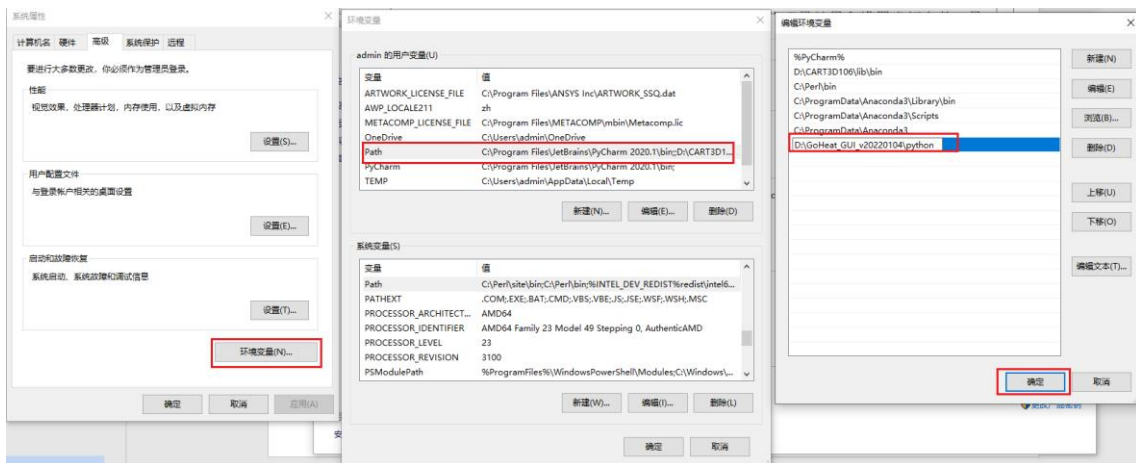


图 67 三维温度场计算流程图

3.10.1 运行结果转换脚本

该步骤需要执行 python 脚本文件，如果计算机中未安装 python 或者 python 版本过低，可以使用软件包中提供的 python 包。将 python 包路径写入计算机环境变量 path 中，这样系统可以找到 python 命令。



(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

软盘编号
CAD

图 68 将 python 配置到环境变量中

将 ANSYS_TRANS_forGoHeat.py 拷贝到结果文件夹（存放不同时刻的气动信息，“6.Temperature\goheat_v3d_traj”）路径下。打开 cmd 命令提示符窗口，进入 goheat_v3d_traj 路径（输入盘符，如“h:”，回车进入到 h 盘，输入“cd heat\RJ_QD002\test_UI\6.Temperature\goheat_v3d_traj\”进入到 py 脚本文件的路径）。通过 python 解释器执行该 py 文件，生成 result 文件夹和工程配置文件。

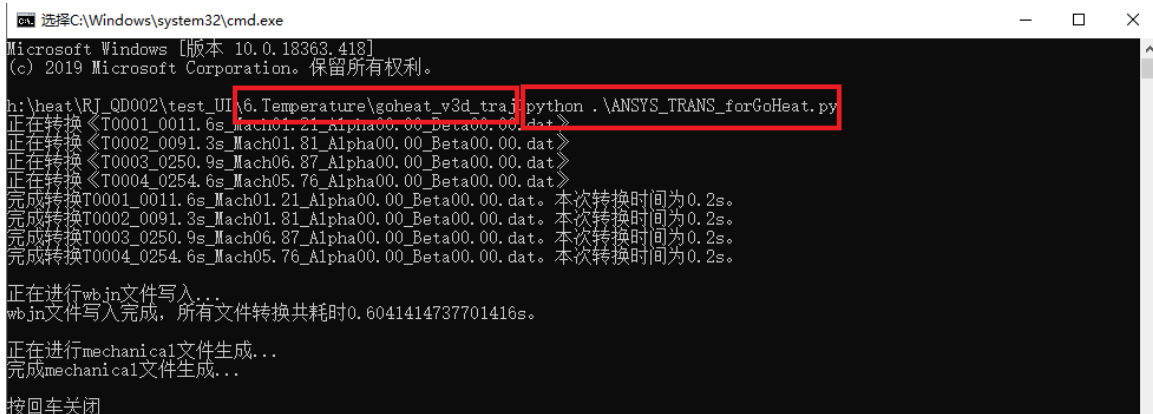


图 69 运行脚本

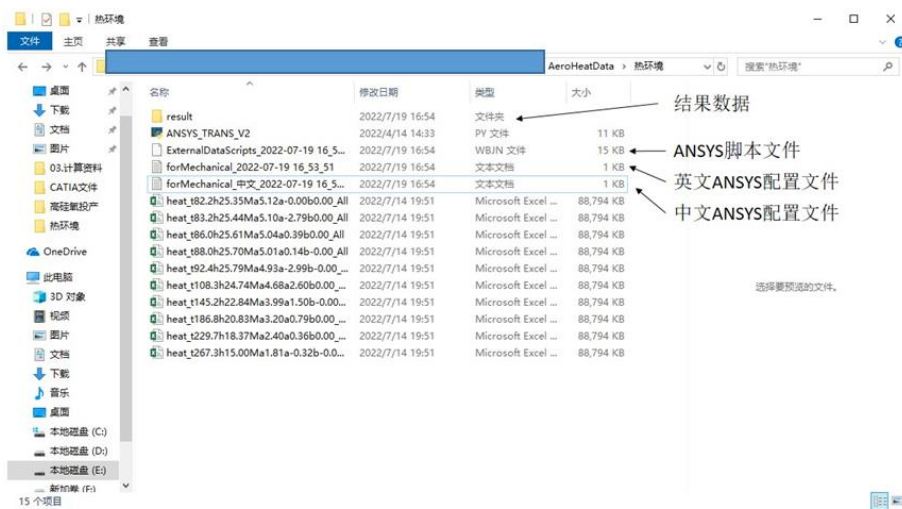


图 70 生成结果和配置文件

3.10.2 打开 workbench 工程

(旧底图登记号)
(底图登记号)

打开 ANSYS workbench，插入脚本文件（文件→脚本→运行脚本文件）打开图 70 计算得到的 ANSYS 脚本文件。

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 42 页	

软盘编号

CAD

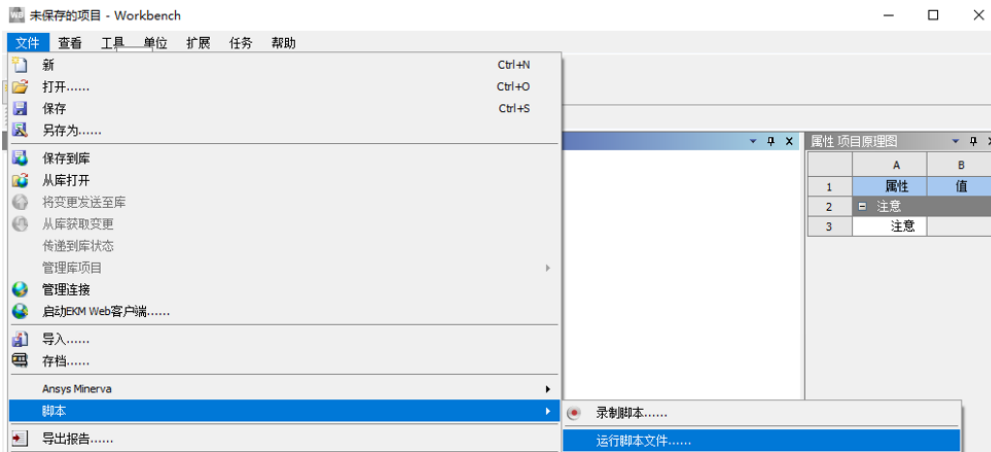


图 71 启动 workbench

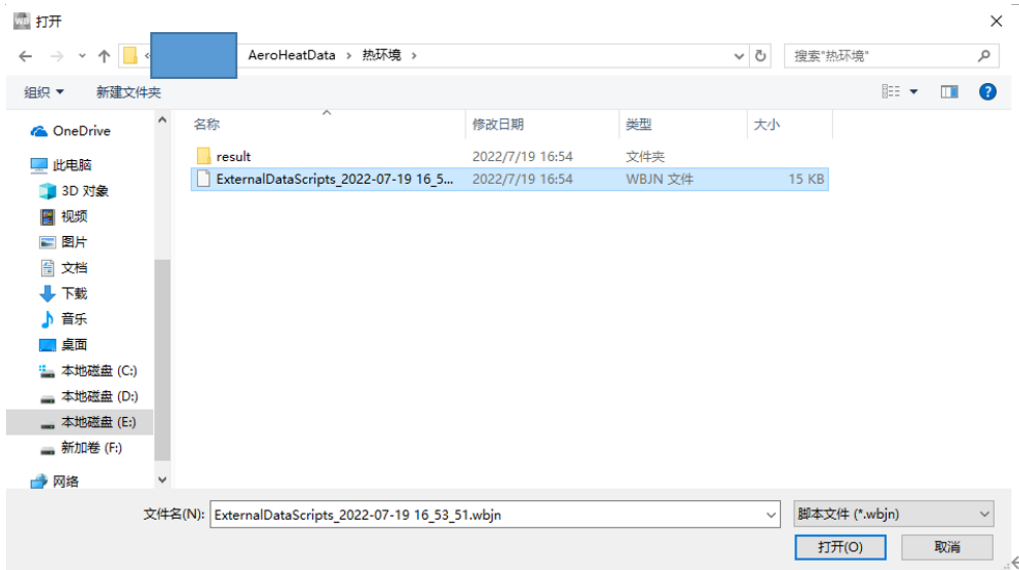


图 72 workbench 运行脚本

3.10.3新建“瞬态热”

新建瞬态热模块，并将导入脚本设置连接到瞬态热设置。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)		

软盘编号

CAD

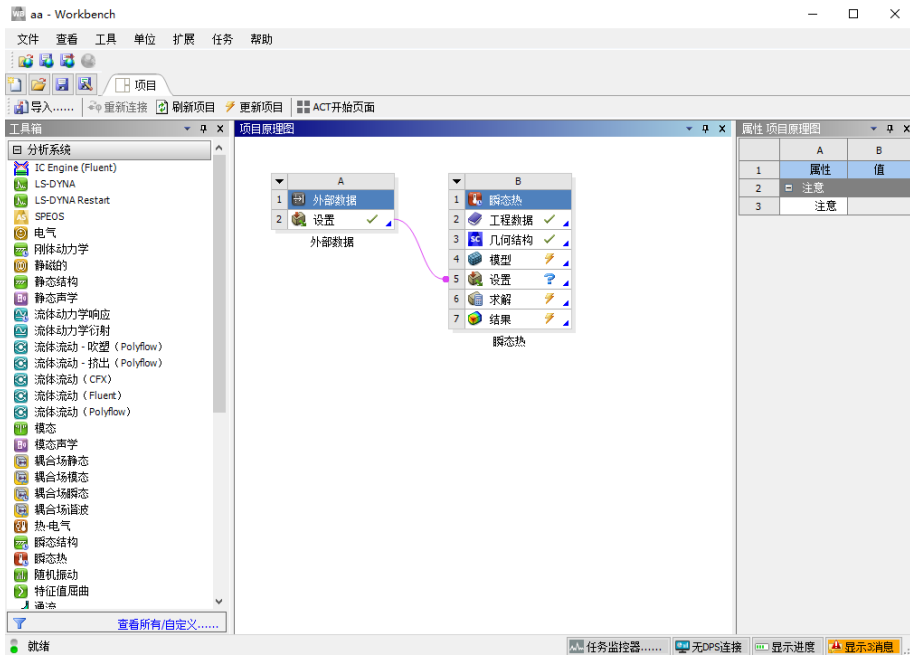


图 73 新建瞬态热模块

3.10.4 工程数据配置

打开工程。根据需要设置材料。举例如下。

在结构钢后右键选择第二个复制，得到结构钢 2（如果需要多个材料，逐个复制即可）。

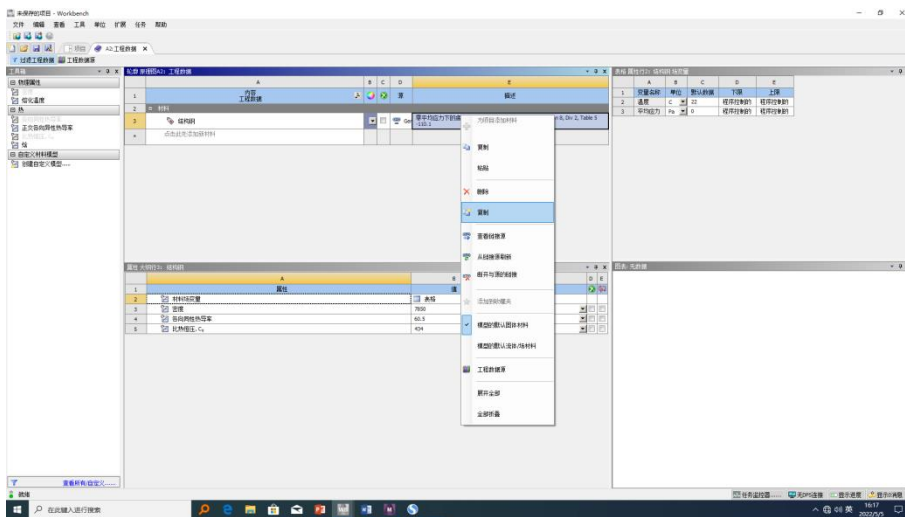


图 74 新增材料

(旧底图登记号)

设置材料属性。包括密度、比热容和导热率。

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

软盘编号	
CAD	

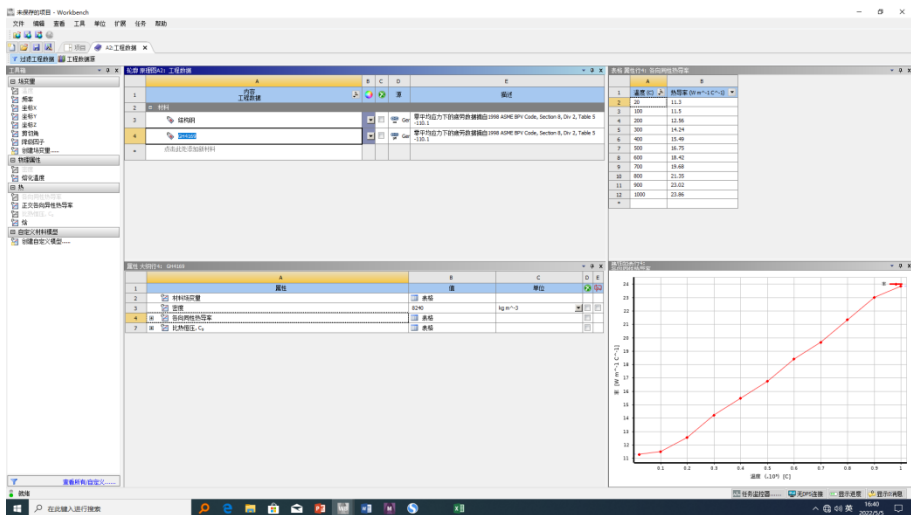


图 75 设置材料属性

3.10.5几何结构和模型

关闭工程数据，右键单击几何结构，选择导入几何模型-浏览，找到所需要计算的模型，点击打开。也可以直接打开几何结构后，导入模型。

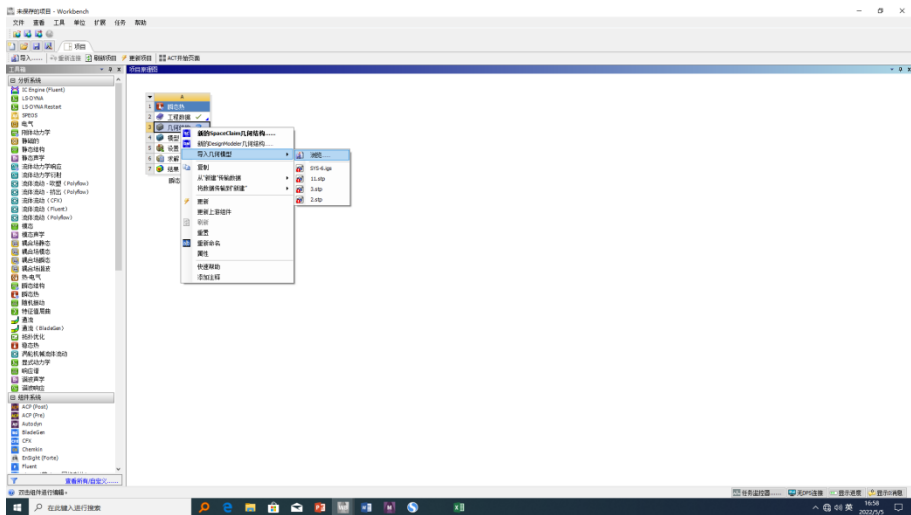


图 76 导入几何模型

打开“模型”界面。在左边项目中的模型-几何结构中定义各模型所用材料。

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
				第 45 页	

软盘编号
CAD

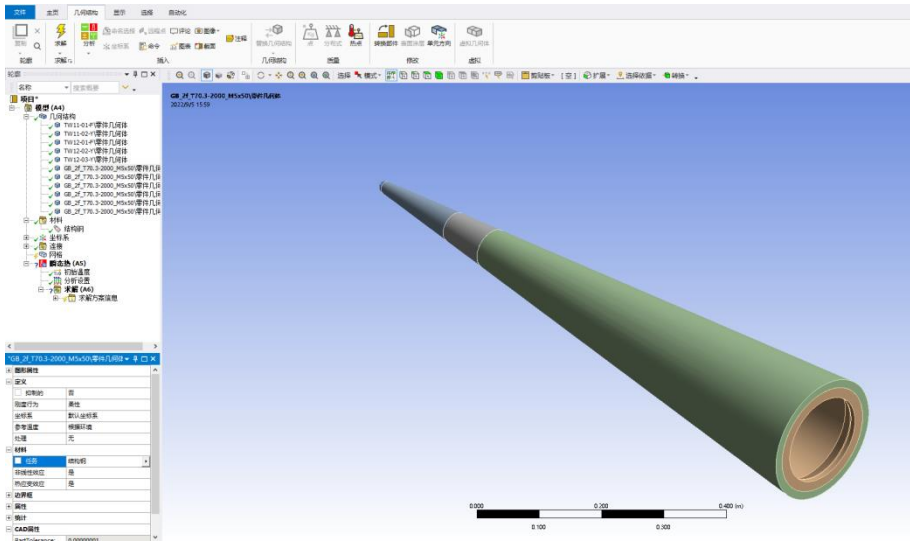


图 77 设置模型材料

双击网格，将单元的阶中的程序控制改成二次项，如图，调整一个合适的单元尺寸，右键网格，选择生成网格。

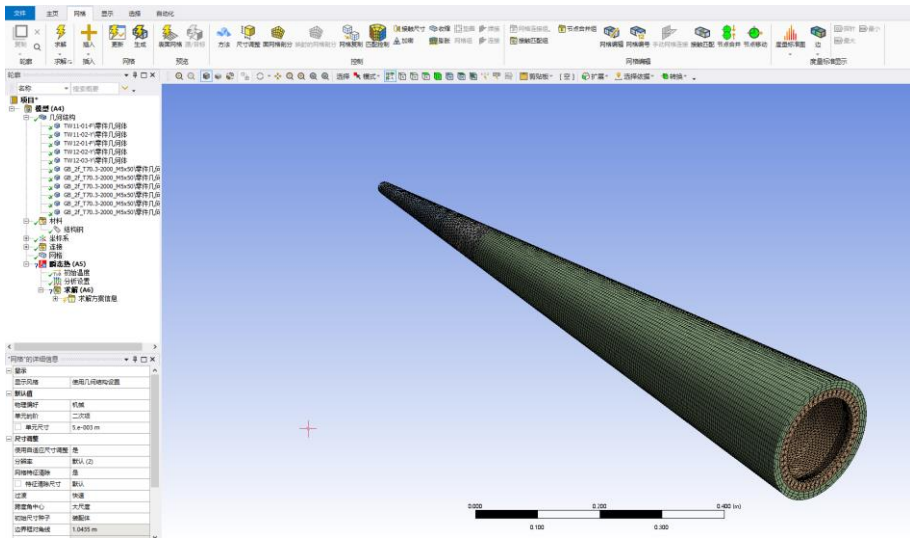


图 78 生成网格

3.10.6求解瞬态热

右键单击瞬态热，选择插入-辐射，同样选择所需加辐射的面并在范围中的几何结构中点击应用，将发射率改成 0.75。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 46 页	

软盘编号

CAD

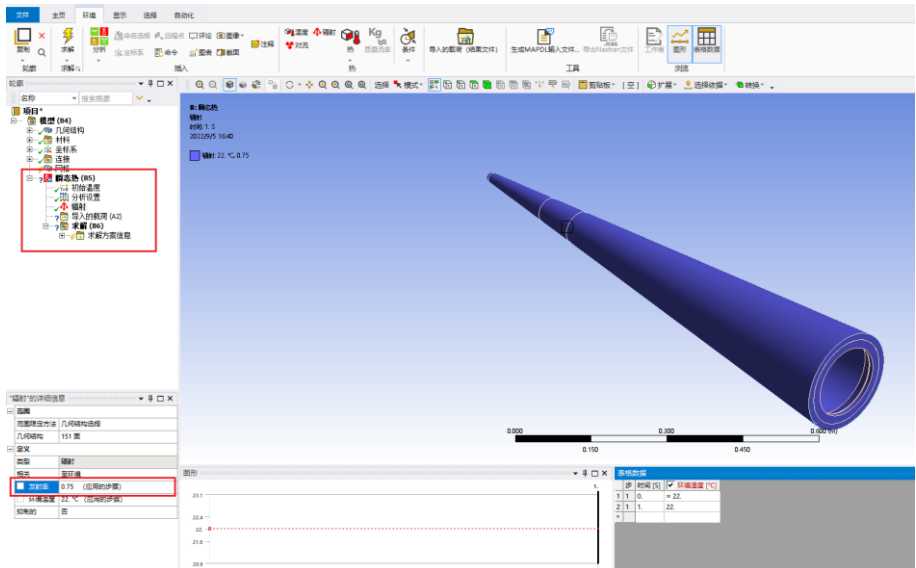


图 79 设置辐射

根据数据中最后的时间，双击瞬态热-分析设置，将左下角步骤结束时间改为数据最后时间，自动时步中的程序控制改为关闭，设置一个合适的时步（建议时间步长小于弹道时间步），这样可以确保时间步长满足精度需要。用户也可以开启自动时步控制，此时，软件会自动调整时间步长。

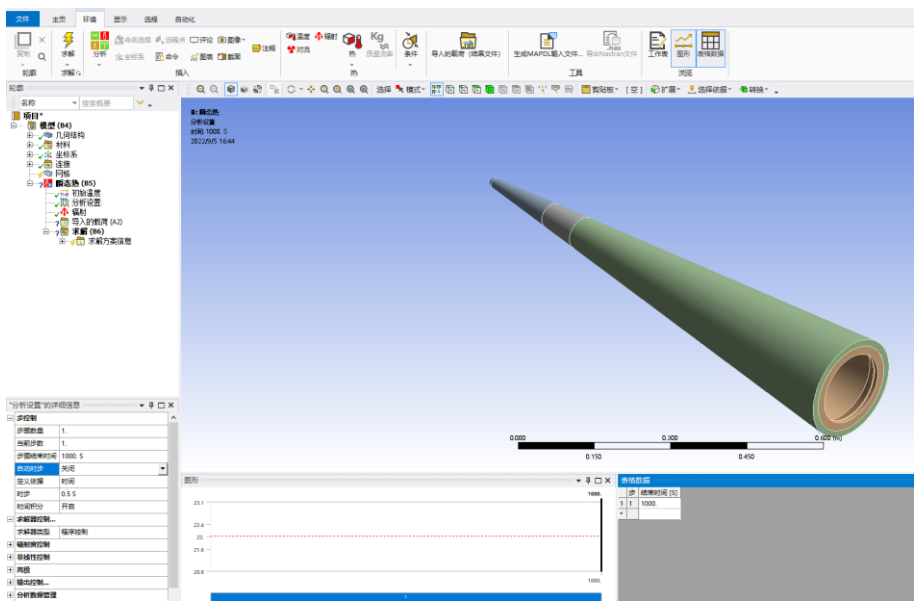


图 80 设置时间步

在导入载荷中加入对流系数（瞬态热→导入的载荷→插入→对流系数）。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

RJ-QD002
第 47 页

RJ-QD002SJ009

软盘编号

CAD

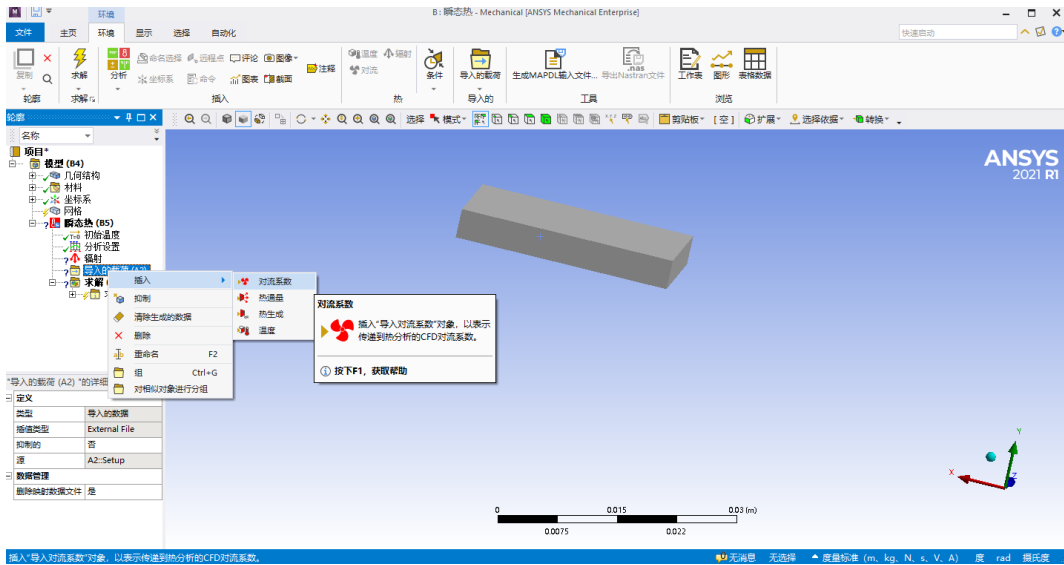


图 81 插入对流系数

打开对应语言的 ANSYS 配置文件，将其中内容复制 mechanical 中。流程如下图。
 1) 全选复制 txt 中的设置文件；2) 选择左边菜单栏中的导入的对流。3) 左键单击红框位置（薄膜系数列，第一行），Ctrl+V 导入相应的参数。选择好需要添加热流的面，点击左下角几何结构应用。

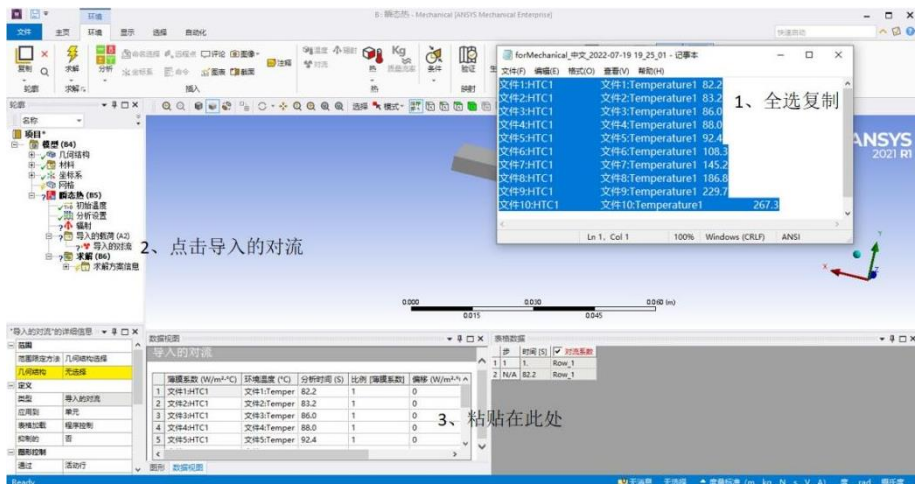


图 82 导入对流

右键单击求解选择求解，计算得到结果。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 48 页	

软盘编号
CAD
(旧底图登记号)
(底图登记号)
(签字、日期)

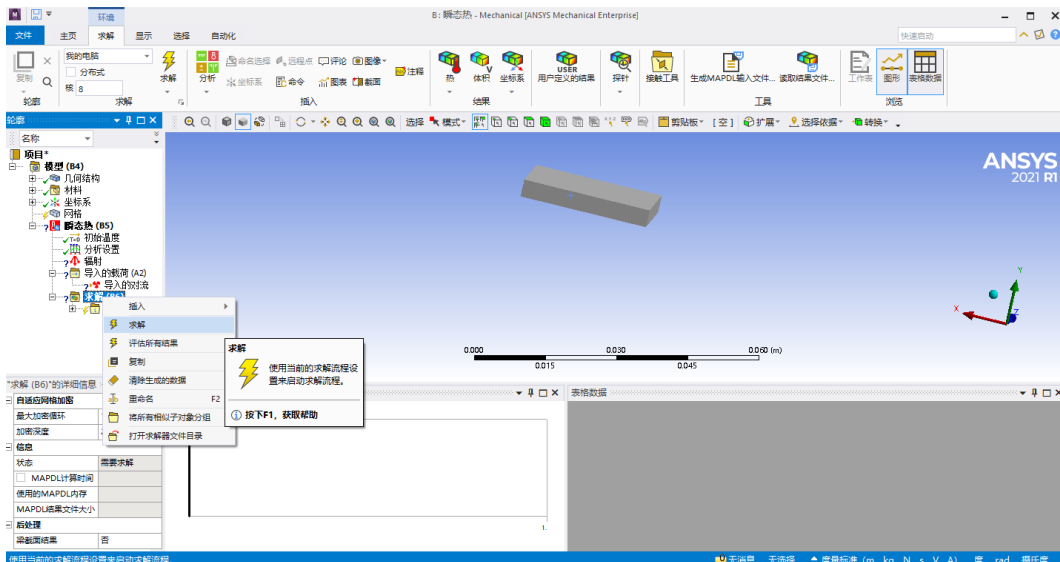


图 83 计算温度

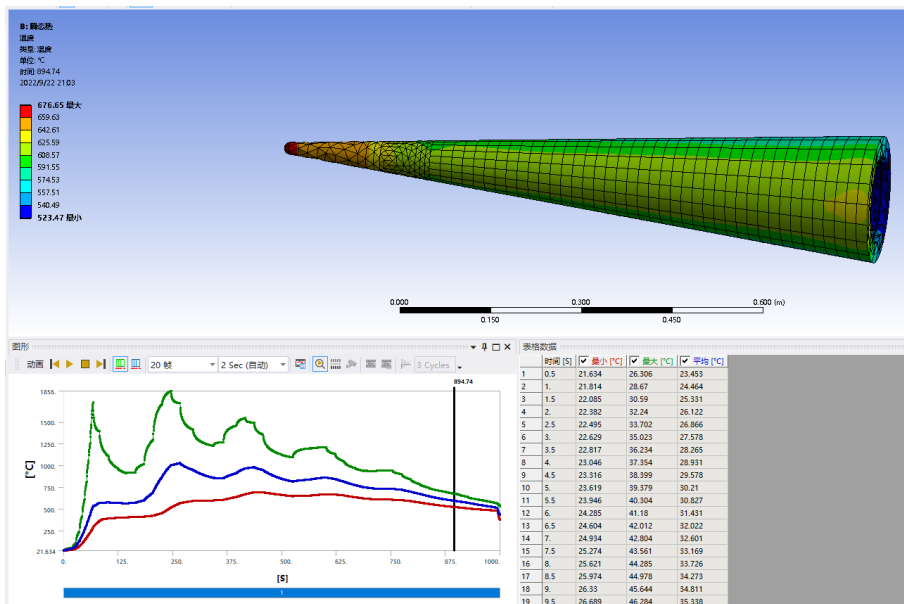


图 84 三维温度云图分布

3.11 脚本运行说明

3.11.1 二次开发接口说明

ACDDP-VX2.py 为脚本运行的主入口，流场求解和热流计算模块均由其调用和管理。flowcart_sweep.py 是流场工况批量计算的入口，调用流场结算模块。goheat_trajectory.py 是热流批量计算的入口，实现了沿弹道的热流计算。用户可以根据自身需求，对相应模块代码进行更改、替换和二次开发。

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
				第 49 页	
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)		

软盘编号

3.11.2粘性修正部分

CAD

在 execute/Addviscous_sweep.py 脚本中, 给出了粘性修正的方法, 里面给出了马赫数对应的高度, 根据经验设定, 马赫数 2.5 以下高度为 0m, 马赫数 3.1 以下高度为 15000m, 马赫数 9.1 以下为 30000m, 马赫数 9.1 以上为 50000m; 用户可根据可信的气动数据进行修改, 注意高度值越大, 粘性力越大。

```
cf.set('STREAM', 'M_inf', str(ma))
cf.set('STREAM', 'alpha', str(a))
if ma <= 2.5:
    cf.set('STREAM', 'H', str(0))
elif ma <= 3.1:
    cf.set('STREAM', 'H', str(15000))
elif ma <= 9.1:
    cf.set('STREAM', 'H', str(30000))
else:
    cf.set('STREAM', 'H', str(50000))
```

4 文件说明

用户可以在工作路径下查看计算结果, 主要包括以下内容:

- 1) 模型 STL 格式文件, 一般由用户放在“0.Model”文件夹。STL 格式为 ASCII 文本格式, 格式如图 85。

```
1 solid exported from Pointwise
2 facet normal -0.000000e+00 -1.000000e+00 0.000000e+00
3   outer loop
4     vertex 7.579955e+00 1.260000e-01 4.535978e-01
5     vertex 7.569648e+00 1.260000e-01 4.640000e-01
6     vertex 7.570409e+00 1.260000e-01 4.519075e-01
7   endloop
8 endfacet
9 facet normal 0.000000e+00 -1.000000e+00 0.000000e+00
10  outer loop
11    vertex 7.601179e+00 1.260000e-01 4.067875e-01
12    vertex 7.609494e+00 1.260000e-01 3.977610e-01
13    vertex 7.609804e+00 1.260000e-01 4.061850e-01
14  endloop
15 endfacet
16 facet normal 0.000000e+00 -1.000000e+00 -0.000000e+00
17  outer loop
18    vertex 7.915787e+00 1.260000e-01 4.050439e-01
19    vertex 7.907074e+00 1.260000e-01 3.962354e-01
20    vertex 7.916752e+00 1.260000e-01 3.961443e-01
21  endloop
22 endfacet
23 facet normal 0.000000e+00 -1.000000e+00 0.000000e+00
24  outer loop
25    vertex 7.956407e+00 1.260000e-01 3.963049e-01
26    vertex 7.965347e+00 1.260000e-01 4.052401e-01
27    vertex 7.955342e+00 1.260000e-01 4.050841e-01
28  endloop
29 endfacet
```

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 50 页

软盘编号

图 85 STL 文件

CAD

- 2) Components.i.dat 为物面流场文件，可以采用 tecplot 进行流场查看，等待结果计算完成后，在“1.Aerodynamic”文件夹生成文件 Components.i.dat。其中前 3 列为点 x、y 和 z 坐标，第 4 列为压力系数 $C_p = \frac{p-p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty u_\infty^2}$ ，第 5 列为密度 Rho，第 6-8 列速度三方向分量 U、V 和 W，第 9 列为无量纲压力 $Pressure = p/\gamma/p_\infty$ 。到此步骤，完成了模型特定单一工况的试算。若有切面，会生成 cutPlanes.dat 文件，如果要查看有量纲的压力云图，可以在 tecplot 中的 data 下输入 $\{P\} = \{Pressure\} * 1.4 * P_\infty$ ；如果查看马赫数云图，可以在 tecplot 中的 data 下输入 $\{Ma\} = \text{sqrt}(\{U\} ** 2 + \{V\} ** 2 + \{W\} ** 2) / \text{sqrt}(1.4 * \{Pressure\} / \{Rho\})$ ；

```

1  TITLE = "Solution mapped to surface triangulation"
2  VARIABLES = x,y,z, Cp, Rho, U, V, W, Pressure
3  ZONE T="Surface", N = 66866, E=133728, F=FEPOINT,ET=TRIANGLE
4  8.072447 -0.273851 0.126000 -0.315417 0.175903 0.330432 -0.231376 -0.159092 0.203310
5  8.072447 -0.266810 0.126000 -0.307491 0.185521 0.236577 -0.289070 -0.009933 0.216149
6  8.052197 -0.266810 0.126000 -0.296836 0.199008 0.226908 -0.345574 -0.060731 0.233411
7  8.052197 -0.273851 0.126000 -0.313248 0.174689 0.193022 -0.200195 -0.096997 0.206824
8  8.072447 -0.259768 0.126000 -0.306919 0.184224 0.206759 -0.228469 0.020745 0.217077
9  8.052197 -0.259768 0.126000 -0.296073 0.197587 0.196951 -0.214345 -0.033869 0.234648
10 8.072447 -0.252727 0.126000 -0.307381 0.182513 0.191758 -0.174038 0.026198 0.216329
11 8.052197 -0.252727 0.126000 -0.297389 0.194690 0.192803 -0.139035 -0.026997 0.232515
12 8.072447 -0.245686 0.126000 -0.307900 0.180581 0.185330 -0.121291 0.027553 0.215488
13 8.052197 -0.245686 0.126000 -0.299337 0.191183 0.198491 -0.092755 -0.023791 0.229359
14 8.072447 -0.238644 0.126000 -0.308579 0.178350 0.186333 -0.075403 0.018203 0.214388
15 8.052197 -0.238644 0.126000 -0.301086 0.187963 0.214547 -0.065867 -0.022500 0.226527
16 8.072447 -0.231603 0.126000 -0.310019 0.175628 0.194534 -0.041604 0.002030 0.212055
17 8.052197 -0.231603 0.126000 -0.303672 0.184381 0.250025 -0.055720 -0.015439 0.222337
18 8.072447 -0.224561 0.126000 -0.313932 0.170457 0.212501 -0.029848 -0.003325 0.205716
19 8.052197 -0.224561 0.126000 -0.308403 0.178751 0.302641 -0.071471 0.029709 0.214673
20 8.072447 -0.217520 0.126000 -0.313922 0.172529 0.364270 -0.032111 0.083406 0.205731
21 8.052197 -0.217520 0.126000 -0.303067 0.187010 0.444251 -0.035339 0.141809 0.223317
22 8.031946 -0.266810 0.126000 -0.299052 0.192003 0.023986 -0.348824 -0.043148 0.229821
23 8.031946 -0.273851 0.126000 -0.311218 0.174237 -0.046399 -0.151065 0.013536 0.210113
24 8.031946 -0.259768 0.126000 -0.298834 0.190901 0.014039 -0.248239 -0.024130 0.230174
25 8.031946 -0.252727 0.126000 -0.299489 0.189360 0.027157 -0.178198 -0.022271 0.229113
26 8.031946 -0.245686 0.126000 -0.300669 0.186984 0.049282 -0.125965 -0.022028 0.227202
27 8.031946 -0.238644 0.126000 -0.302066 0.184693 0.083789 -0.089859 -0.022923 0.224938
28 8.031946 -0.231603 0.126000 -0.304952 0.181536 0.139830 -0.071764 -0.014786 0.220263

```

图 86 结果文件说明

- 3) “1.Aerodynamic”文件夹中 forces.dat 和 moments.dat 为迭代过程中气动力和力矩的收敛曲线，一般选取最后一步作为最终结果，气动力和力矩在计算坐标系下给出。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)

第 51 页

软盘编号
CAD
(旧底图登记号)
(底图登记号)
(签字、日期)

```

forces.dat
1 # cmd: FlowCart -his -clic -T -mg 3 -N 120 -cfl 1.400000 -tm 0.800000
2 #
3 # cmd: FlowCart -his -clic -T -mg 3 -N 120 -cfl 1.400000 -tm 0.800000
4 # Compiled on Oct 23 2016, 10:27:55
5 #
6 # Surface Triangulation file: Components.i.tri
7 # Mesh file: Mesh.mg.c3d
8 # Input control file: input.cntl
9 #
10 # Number of subdomains used: 64
11 #
12 # Mach No = 1.2000, alpha = 0.000, beta = 0.0000, gamma = 1.4
13 # cfl = 1.40, FluxFun = 0, Limiter = 5,
14 # nMGlev = 3, MGcycleType = 2, MG_nPre = 1, MG_nPost = 1
15 #
16 # RK 0.06950 1 # stageCoef GradEval
17 # RK 0.16020 0 # stageCoef GradEval
18 # RK 0.28980 0 # stageCoef GradEval
19 # RK 0.50600 0 # stageCoef GradEval
20 # RK 1.00000 0 # stageCoef GradEval
21 #
22 # mgCycle CPUtime/proc Force[X] Force[Y] Force[Z]
23 # 1 0.031 5.13020978e-001 2.86279348e-004 -5.12889728e-003
24 # 2 0.047 8.35351049e-001 1.29334423e-004 -5.18582125e-003
25 # 3 0.078 1.02037321e+000 -9.45690730e-005 -2.28738880e-003
26 # 4 0.093 1.11165910e+000 -1.03853520e-004 1.84738097e-003
27 # 5 0.125 1.14234408e+000 1.07991847e-004 5.84087077e-003
28 # 6 0.140 1.12632508e+000 3.84743353e-004 8.77065527e-003
29 # 7 0.172 1.06443128e+000 5.96151241e-004 1.01958143e-002
30 # 8 0.187 1.03804820e+000 6.82139461e-004 1.00801157e-002
31 # 9 0.218 9.97110368e-001 6.34089910e-004 8.67721184e-003
32 # 10 0.234 9.66609093e-001 4.84276597e-004 6.43637240e-003
33 # 11 0.265 9.48274830e-001 2.85667287e-004 3.88465307e-003
34 # 12 0.281 9.40471498e-001 9.09690438e-005 1.49522545e-003
35 # 13 0.312 9.39666613e-001 -6.73551541e-005 -3.75139479e-004
36 # 14 0.328 9.42560375e-001 -1.79402078e-004 -1.54050414e-003
37 # 15 0.640 9.80815138e-001 -7.98483297e-004 -1.24278555e-003
38 # 16 0.968 9.76998295e-001 -6.58849753e-004 1.04445676e-003
39 # 17 1.281 9.72756817e-001 -1.07222126e-004 8.66734797e-004
40 # 18 1.593 9.71817015e-001 2.27397291e-004 9.47714831e-004
    
```

图 87 forces.dat 文件

```

moments.dat
1 # cmd: FlowCart -his -clic -T -mg 3 -N 120 -cfl 1.400000 -tm 0.800000
2 #
3 # cmd: FlowCart -his -clic -T -mg 3 -N 120 -cfl 1.400000 -tm 0.800000
4 # Compiled on Oct 23 2016, 10:27:55
5 #
6 # Surface Triangulation file: Components.i.tri
7 # Mesh file: Mesh.mg.c3d
8 # Input control file: input.cntl
9 #
10 # Number of subdomains used: 64
11 #
12 # Mach No = 1.2000, alpha = 0.000, beta = 0.0000, gamma = 1.4
13 # cfl = 1.40, FluxFun = 0, Limiter = 5,
14 # nMGlev = 3, MGcycleType = 2, MG_nPre = 1, MG_nPost = 1
15 #
16 # RK 0.06950 1 # stageCoef GradEval
17 # RK 0.16020 0 # stageCoef GradEval
18 # RK 0.28980 0 # stageCoef GradEval
19 # RK 0.50600 0 # stageCoef GradEval
20 # RK 1.00000 0 # stageCoef GradEval
21 #
22 # Moment center is at MomentCenter[x,y,z] = [0, 0, 0]
23 # Moment log output is in model coordinate system
24 # mgCycle CPUtime/proc Moment_model[X] Moment_model[Y] Moment_model[Z]
25 # 1 0.031 -5.91062284e-005 2.54099408e-002 -3.82113247e-006
26 # 2 0.047 -6.50893871e-005 2.45899346e-002 -5.74878505e-004
27 # 3 0.078 -2.62899631e-005 8.55731656e-003 -1.24425804e-003
28 # 4 0.093 3.91780092e-005 -1.37599083e-002 -1.19131602e-003
29 # 5 0.125 1.17510926e-004 -3.49234904e-002 -2.38948627e-004
30 # 6 0.140 1.87379649e-004 -5.01679939e-002 1.11564123e-003
31 # 7 0.172 2.38047866e-004 -5.73137966e-002 2.34324997e-003
32 # 8 0.187 2.63922015e-004 -5.61941500e-002 3.07327260e-003
33 # 9 0.218 2.59767542e-004 -4.79892206e-002 3.15606084e-003
34 # 10 0.234 2.23502795e-004 -3.49108908e-002 2.64820613e-003
35 # 11 0.265 1.58756493e-004 -1.98538780e-002 1.75703966e-003
36 # 12 0.281 7.68626595e-005 -5.66130299e-003 7.57652158e-004
37 # 13 0.312 -6.78674725e-006 5.21041116e-003 -1.25160435e-004
38 # 14 0.328 -7.69135913e-005 1.14592131e-002 -8.12053425e-004
39 # 15 0.640 -1.16349965e-004 8.02382196e-003 -4.07387303e-003
40 # 16 0.968 -1.03122549e-005 -5.76243756e-003 -4.05888562e-003
    
```

图 88 moments.dat 文件

4) 气动后处理结果文件说明。用户通过“工具”->“多工况计算”，可以实现多个工况的扫略计算。在“1.Aerodynamic”生成“CFD_base”（文件夹名称可以设置）文件夹，内存放各工况计算获得的气动六分量。其中 aero6_datas.dat 以列表形式处理后的气动结果，如果用户选择了粘性修正，则无粘的数据保存为 aero6_datas_Euler.dat。beta 代表侧滑角，Ma 代表马赫数，alpha 代表攻角，CA

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 52 页	

软盘编号	
CAD	

各测点的坐标值和流线截断位置。

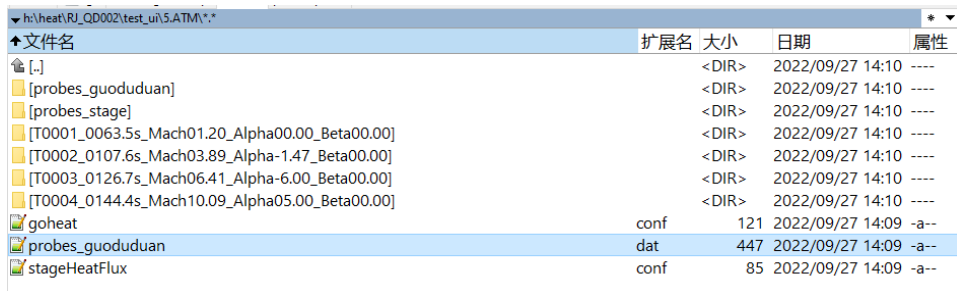


图 92 测点数据文件

Line	x (m)	y (m)	z (m)	P (Pa)	Hr (K)	q (KW/m ²)
1	4.29341	0.391427	0	0.01336		
2	5.08535	0.464058	0	0.01336		
3	4.29561	0.138798	0.303466	0.01336		
4	4.75915	0.0568108	0.376018	0.01336		
5	5.29206	-0.0251762	0.459374	0.01336		
6	4.1206	0.0428475	-0.0104286	0.01336		
7	4.28299	-0.0184526	-0.00412194	0.01336		
8	4.51949	-0.107735	0.00218475	0.01336		
9	4.76388	-0.200005	0.000608077	0.01336		
10	4.91997	-0.258906	-0.00254527	0.01336		
11	5.27157	-0.391607	-0.00412194	0.01336		
12	5.51437	-0.483237	-0.00569861	0.01336		

图 93 测点数据文件说明

- 7) 在“5.ATM\T00***Mach**”文件夹中 Qw_probes_xxx.dat 为热流计算结果，xxx 为部件名称，文件格式为坐标点、压力、恢复焓以及热流密度，见图 94，用户可以在 tecplot 中查看。

Line	x (m)	y (m)	z (m)	P (Pa)	Hr (K)	q (KW/m ²)
1	4.293410	0.391427	0.000000	33061.725023	295.236400	-1.107823
2	5.085350	0.464058	0.000000	35057.961750	295.429860	-1.015435
3	4.295610	0.138798	0.303466	34435.974536	295.433265	-1.078564
4	4.759150	0.056811	0.376018	37302.596067	295.702517	-1.082821
5	5.292060	-0.025176	0.459374	36547.967520	295.617585	-1.090597
6	4.120600	0.042847	-0.010429	32260.399599	297.987615	-0.414375
7	4.282990	-0.018453	-0.004122	34106.744754	298.026987	-0.599258
8	4.519490	-0.107735	0.002185	39848.956187	298.309687	-0.061894
9	4.763880	-0.200005	0.000608	41295.566141	298.211524	-0.204855
10	4.919970	-0.258906	-0.002545	41135.610713	298.093455	-0.284861
11	5.271570	-0.391607	-0.004122	40155.399879	297.747347	-0.451292
12	5.514370	-0.483237	-0.005699	36497.399929	297.205861	-0.472025

图 94 热流计算结果文件 Qw_probes_xxx.dat 数据

- 8) 弹道测点的热环境文件。在“5.ATM\probes_***”内存放着部件测点沿弹道的热流变化信息。文件内保存弹道时间、压力、恢复焓和热流，如图 96，可以通过 tecplot 打开。

(旧底图登记号)

(底图登记号)

				RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	第 54 页	

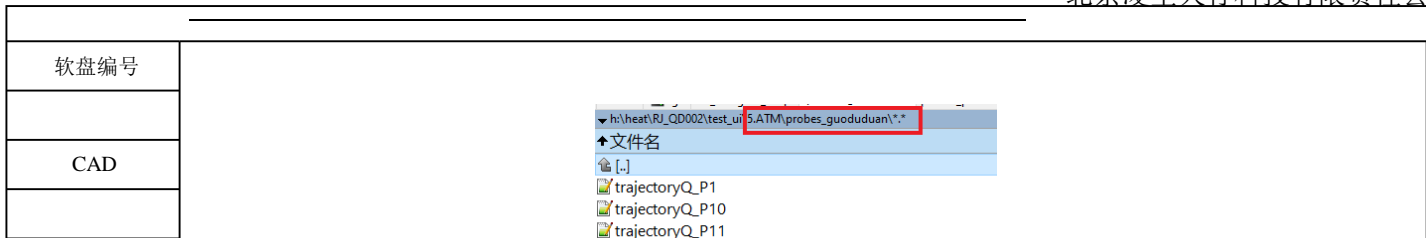


图 95 测点沿弹道热流环境文件

trajectoryQ_P1.dat	Variables=t (s), P (Pa), Hr (kJ/kg), q (KW/m ²)
1	63.450000 33061.725023 295.236400 -1.107823
2	63.950000 32731.327166 301.614893 -0.677323
3	64.450000 32400.929309 307.993386 -0.246822
4	64.950000 32070.531452 314.371879 0.183678
5	65.450000 31740.133594 320.750372 0.614178
6	65.950000 31409.735737 327.128865 1.044678
7	66.450000 31079.337880 333.507358 1.475179
8	66.950000 30748.940023 339.885851 1.905679
9	67.450000 30418.542166 346.264344 2.336179
10	67.950000 30088.144309 352.642837 2.766680
11	68.450000 29757.746452 359.021330 3.197180
12	68.950000 29427.348594 365.399823 3.627680
13	69.450000 29096.950737 371.778316 4.058180
14	69.950000 28766.552880 378.156809 4.488681
15	70.450000 28436.155023 384.535302 4.919181
16	70.950000 28105.757166 390.913795 5.349681
17	71.450000 27775.359309 397.292287 5.780182
18	71.950000 27444.961452 403.670780 6.210682

图 96 测点沿弹道热环境文件说明

9) 三维热环境文件。在“5.ATM\T00***Mach**”文件夹中“Component.v.plt”文件是该工况下的三维热环境结果文件。文件可以通过 tecplot 打开，其中保存了模型物面点坐标、边缘马赫数 Ma_{edge}、压力 P、恢复焓 Haw、热流 Qw、雷诺数 Re_{theta} 和边界层厚度 theta。

Component.v.plt	Component.v.plt
1	VARIABLES = "X", "Y", "Z", "Ma _{edge} ", "P(Pa)", "Haw(kj/kg)", "Qw(kw/m ²)", "Re _{theta} ", "theta"
2	ZONE T="Surface", N = 4786, E = 9568, ZONETYPE=FETRIANGLE
3	DATAPACKING=BLOCK
4	VARLOCATION=([1-3]=NODAL, [4-11]=CELLCENTERED)
5	2.703296e+00 2.489740e+00 2.489740e+00 2.703296e+00 2.298825e+00 2.298825e+00 2.128143e+00 2.128143e+00 1.975545e+00
6	1.345105e+00 1.345105e+00 1.275249e+00 1.275249e+00 1.212728e+00 1.212728e+00 1.156752e+00 1.156752e+00 1.106618e+00
7	8.973000e-01 8.973000e-01 8.735760e-01 8.735760e-01 8.521240e-01 8.521240e-01 8.326730e-01 8.326730e-01 8.149790e-01
8	7.344290e-01 7.344290e-01 7.237010e-01 7.237010e-01 7.133560e-01 7.133560e-01 7.032630e-01 7.032630e-01 6.932960e-01
9	5.982960e-01 5.982960e-01 5.824630e-01 5.824630e-01 5.666300e-01 5.666300e-01 5.507960e-01 5.507960e-01 5.349630e-01
10	4.399630e-01 4.399630e-01 4.241300e-01 4.241300e-01 4.082960e-01 4.082960e-01 3.924630e-01 3.924630e-01 3.766300e-01
11	2.816300e-01 2.816300e-01 2.657960e-01 2.657960e-01 2.499630e-01 2.499630e-01 2.341300e-01 2.341300e-01 2.182960e-01
12	1.232960e-01 1.232960e-01 1.074630e-01 1.074630e-01 9.163000e-02 9.163000e-02 7.579600e-02 7.579600e-02 5.996300e-02
13	1.303000e-02 1.303000e-02 9.905000e-03 9.905000e-03 7.148000e-03 7.148000e-03 4.796000e-03 4.796000e-03 2.883000e-03
14	1.839106e+00 1.717108e+00 1.608012e+00 1.510445e+00 1.423176e+00 1.345105e+00 1.275249e+00 1.212728e+00 1.156752e+00
15	7.988190e-01 7.839880e-01 7.703010e-01 7.575830e-01 7.456760e-01 7.344290e-01 7.237010e-01 7.133560e-01 7.032630e-01
16	5.191300e-01 5.032960e-01 4.874630e-01 4.716300e-01 4.557960e-01 4.399630e-01 4.241300e-01 4.082960e-01 3.924630e-01

图 97 三维热环境文件说明

10) 热响应结果文件。在“6.Temperature\probes_**\result”文件夹中，存放着各测点的温度结果文件“input_P*.csv”。文件可以通过 Excel 或者 tecplot 打开，

(旧底图登记号)					
(底图登记号)					
(签字、日期)	(标记)	(更改单号)	(签字、日期)	RJ-QD002	RJ-QD002SJ009
				第 55 页	

软盘编号

其中保存着弹道时间、测点材料各层间的温度、冷壁热流和热壁热流，如图

CAD

99。

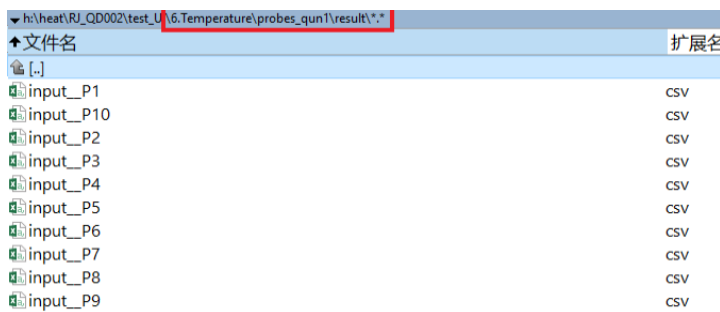


图 98 测点热响应文件

A	B	C	D	E	F
时间(s)	3.0mm1Cr17Ni2外表面温度(°C)	4.0mm2A12外表面温度(°C)	4.0mm2A12内表面温度(°C)	300K冷壁热流(kw/m2)	热壁热流(kw/m2)
1.16E+01	2.34E+01	2.22E+01	2.21E+01	1.64E+01	1.77E+01
1.21E+01	2.41E+01	2.25E+01	2.24E+01	1.63E+01	1.74E+01
1.26E+01	2.46E+01	2.29E+01	2.28E+01	1.62E+01	1.71E+01
1.31E+01	2.50E+01	2.32E+01	2.31E+01	1.61E+01	1.68E+01
1.36E+01	2.54E+01	2.36E+01	2.35E+01	1.60E+01	1.65E+01
1.41E+01	2.67E+01	2.40E+01	2.39E+01	1.59E+01	1.63E+01
1.46E+01	2.61E+01	2.44E+01	2.43E+01	1.58E+01	1.60E+01
1.51E+01	2.64E+01	2.48E+01	2.46E+01	1.56E+01	1.58E+01
1.56E+01	2.68E+01	2.51E+01	2.50E+01	1.55E+01	1.56E+01
1.61E+01	2.71E+01	2.55E+01	2.54E+01	1.54E+01	1.53E+01
1.66E+01	2.75E+01	2.58E+01	2.57E+01	1.53E+01	1.51E+01
1.71E+01	2.78E+01	2.62E+01	2.61E+01	1.52E+01	1.49E+01
1.76E+01	2.81E+01	2.65E+01	2.64E+01	1.51E+01	1.47E+01
1.81E+01	2.84E+01	2.69E+01	2.68E+01	1.50E+01	1.45E+01
1.86E+01	2.87E+01	2.72E+01	2.71E+01	1.49E+01	1.43E+01
1.91E+01	2.90E+01	2.75E+01	2.74E+01	1.48E+01	1.41E+01

图 99 测点热响应文件说明

(旧底图登记号)

(底图登记号)

RJ-QD002

RJ-QD002SJ009

(签字、日期)

(标记)

(更改单号)

(签字、日期)