商品使用指南

欢迎您使用【混合网格计算流体力学仿真系统】。

一、定义

 【混合网格计算流体力学仿真系统】是指由【西安前沿动力软件开发有限公司】自主开 发的一款针对复杂构型气动-结构相互耦合作用的仿真工具】。

二、登录、使用方法

- 在华为云市场购买本商品之后,5天内商家生成配套license,并向客户发送含有license 的安装包及安装、使用手册,用户可将将软件安装包拷贝到电脑上,选择合适的安装目 录,根据软件安装指引进行软件安装及使用。
- 安装完成后,用户可双击可执行文件登录软件,输入自定义案例名,并点击"确定", 即可登录软件。
- 3. 如安装中遇到问题可联系商家指导安装。

三、操作手册

3.1菜单介绍

界面菜单包括File, New, Project, Case, View, Solver, Window, XYPlot, Surface, Volume和Help, 如下图所示。



File菜单可以打开已有工程,保存、重命名、关闭、删除工程或退出;

New菜单可以创建新的工程;

Project菜单可以对工程进行操作或创建新的算例(Case);

Case菜单可对当前算例进行操作;

View菜单可以调整视窗;

Solver菜单对计算过程(开始、暂停、续算等)进行控制;

Window对面板可视化进行控制;

XYPlot用来控制曲线显示功能;

Surface和Volume可在后处理时对物面边界或流场的相关参数进行云图绘制和显示。

下面详细介绍每个菜单的内容和用途:

3.1.1 文件菜单 File

用于对工程Project的操作,包括 加载工程Load project 工程另存为Save Project As

重命名工程Rename Project

关闭工程Close Project

删除工程Delete Project和退出软件Exit

3.1.2 新建菜单 New

创建一个新的工程,工程Project指的是,在同一气动网格下创建的计算分析 都可以放在同一个工程中,如果气动网格有变动,需要创建新的工程。

3.1.3 工程操作菜单 Project

在一个工程树上进行操作,包括

创建一个CFD计算分析(算例)

视图显示Show View Page

视图隐藏Hide View Page

重命名工程Rename Project

工程另存为Save Project As...

关闭工程Close Project

删除工程Delete Project

在当前工程下,会有若干不同的CFD算例,例如相同计算条件下有定常算例、 非定常算例,那么在视图显示和隐藏的时候,可以同时操作这三个算例中的视图 显示与隐藏。

1) 视图显示Show View Page:

当前页面Current Pages

所有算例页面All Pages

所有计算中的算例页面All Running Pages 所有停止后的算例页面All Stopping Pages 所有完成的算例页面All Done Pages 所有出错的算例页面All Error Pages 所有初始算例页面All Initial Pages 2) 视图隐藏Hide View Page: 当前页面Current Pages 所有算例页面All Pages 所有计算中的算例页面All Running Page, 所有停止后的算例页面All Stopping Pages 所有完成的算例页面All Done Pages 所有出错的算例页面All Error Pages 所有初始算例页面All Initial Pages

3.1.4 当前算例菜单 Case

对当前算例和算例显示页面进行操作,包括 可视化操作Visualization 视图显示Show View Page 视图隐藏Hide View Page 重命名算例Rename Analysis 删除计算输出文件Delete Output Data 删除算例Delete Analysis 可视化操作Visualization 曲线绘制X-Y Plot 表面网格结果显示Surface Grid 流场体网格结果显示Volume Grid

3.1.5 显示页面的可视化操作菜单 View

沿X轴正方向视角调整Align To Plus X Axis 沿X轴负方向视角调整Align To Minus X Axis

沿Y轴正方向视角调整Align To Plus Y Axis 沿Y轴负方向视角调整Align To Minus Y Axis 沿Z轴正方向视角调整Align To Plus Z Axis 沿Z轴负方向视角调整Align To Minus Z Axis 重置放大比例Reset Camera

放大Zoom+

缩小Zoom-

背景颜色调整Background Color:

黑Black\白White\蓝Blue,

其它颜色More Colors:

JoystickCamera Interaction

Trackball Camera Interaction

JoystickActor Interaction

TrackballActor Interaction

全景视图Perspective

交互显示Interaction

3.1.6 求解菜单 Solver

开始Start(快捷键F9) 暂停Pause 继续Continue 取消Cancel(快捷键F10) 将界面显示曲线保存成图片Save Scene As Image

3.1.7 界面面板操作 Window

隐藏/显示主面板Hide Main Panel (快捷键F5) 隐藏/显示底部面板Hide Bottom Panel (快捷键F6) 隐藏/显示信息显示面板Hide View Information Panel (快捷键F7) 工具栏Toolbars, 隐藏/显示工具栏Hide Toolbars 应用设置Application Setting (快捷键F3) 工具栏Toolbars:选择是否显示菜单对应的图标,可以进行此操作的菜单如下图所示,详细的菜单图标含义在界面工具栏图标中详细介绍:





3.1.8 计算结果模型表面网格操作菜单 Surface

完成计算后,在这里加载模型表面网格计算结果文件,绘制图形进行模型表面参数的分析,因为是对面网格计算结果的图形绘制,因此菜单的主要功能是选择数据结果在模型表面的绘制类型等,菜单列表中包含:

加载数据文件Load Data

图形阴影显示Shade

网格显示Mesh

离散显示Scatter

模型边界线显示Edge

矢量(流线)绘制Vector

等值线(例如如等压线)绘制Contour

	Solver 🕕 Pos	tProcess 🕕 Visualization	
Surf	ace Grid		
	Load &	Modify Data	
	🗖 Shade	🗌 Mesh	
	🗆 Scatter	🗖 Edge	
	Vector	Contour	

图 3 物面数据可视化按钮

3.1.9 计算结果流场体网格操作菜单 Volume

完成计算后,在这里加载流场体网格计算结果文件,绘制图形进行流场分析,由于是对流场结果的图形绘制,因此菜单的功能还包含了切面和迹线的操作显示,

菜单列表中包含:

加载数据文件Load Data

图形阴影显示Shade

网格显示Mesh

离散显示Scatter

模型边界线显示Edge

矢量(流线)绘制Vector

等值线(例如等压线)绘制Contour

切面操作Slice

迹线显示Streamtraces

3.1.10 帮助菜单 Help

允许提示Enable Prompting 允许加载视窗Enable Loading View Pane 用户手册User Guide(快捷键F1)

快捷键列表Keyboard Shortcuts。

3.2 界面介绍

3.2.1 主界面说明

打开SimWork 4.0后,软件启动后的主界面如下图所示:

Rie Neu Polied Care Versie State Wieder Weite Lehen Versie Help Construction Constru	ADI.SimWork		- ø ×
Comparison of the state of	File New Project Case View Solver Windo	Jow XVPlot Surface Volume Help	
Image: Second	🖄 🖆 🕤 🖾 🗙 🚱 🖾 🖏 🎼 🖻	🍪 🍪 🗼 🐹 📈 🚰 🛱 💢 🔍 🔍 🔍 💭 🌆 🗽 🗼 🚛 🔛 🏰 🔛 🦻 😵 🗤 Ank Space, D-7001 Serwinek 0.04751Lab. 🕶 🧰	
Cost		ADI.SimWork 4.0 ADI.SimWork is the world's first Multi-discipline, Multi-fidelity Analysis & Optimization (4MAO)software.	
Care 40.02030/_sbb	When is A42.50% of 14 Romain by Advanced Systems Advanced Systems at A45.57.67 March 2010 March 201	Compared Proof To JUO Stankowk (DePS1, & Aurouch /PES1, & Auron ange" To JUO Stankowk (DePS1, & Aurouch /PES1, & JUT In second ange" To JUO Stankowk (DePS1, & Aurouch /PES1, & JUT In second ange" To JUO Stankowk (DePS1, & Aurouch /PES1, & JUT In second ange"	4
	Case		4.0.0.202007_alpha

图 4 主界面

点击 之后, 创建一个新的工程, 界面如下图所示:

File New Project Case Yew Solver Window Surface You've Help	
💈 🖆 🕼 📉 🗙 🕼 🎼 🍇 🎉 💺 杰 杰 武 芹 定 定 Q. Q. Q. 扁馬属 📳 🏭 🏶 🗠 🎾 🛞 West Space C/ADIS INVerSIGNETS AND AT SIANCE I	
集显示数板 Parcial Protect Val I Model Packey Get 化合称 Type (Indicat Val I Packey) 信息控显示面板	70120 -144

图 5工程界面

界面中除了主显示窗口之外,有三个显示面板:主显示面板、底部显示面板 和信息栏显示面板。

主显示窗口可显示的图形有:前处理中的模型气动网格,计算过程的各类曲线,后处理时的图形等。

主显示面板的内容: 创建或打开的工程列表, 以及各工程中的算例列表。

底部显示面板的内容:结构文件、气动网格文件的加载,计算条件设置入口, 后处理设置控制。

信息栏显示面板的内容:除了显示插值运算、各类数值计算的过程信息外, 面板里还可以显示更多详细的选项和设置。

底部显示面板和信息栏显示面板的内容会在后面几章中做详细介绍。

3.2.2 界面工具栏图标

工具栏图标按键的含义如下:



任 开始计算

暂停

help

≫ 继续

取消计算

保存当前屏幕上的曲线(保存在硬盘中,有五种图片格式)

Q Q Q _{重置、放大、缩小屏幕显示}

₽ 2 视角快速变近(放大)或远(缩小)、重叠功能

🗊 🖬 💵 隐藏/显示主显示面板、底部显示面板和信息栏显示面板

☞显示求解页面(计算过程中在右下工具栏处隐藏右下工具栏并显示求解 过程)

₩ 显示计算过程中的曲线(残差、系数等)

▶ 显示物理边界面,完成求解之后进行后处理时点击此按钮,在菜单Surface 上点击Load Data加载物理边界面上保存的计算结果文件并显示,或在左下工具 栏中控制读取结果文件

☑ 显示流场,完成求解之后进行后处理时点击此按钮,在菜单Volume上点击Load Data加载流场保存的计算结果文件并显示,或在左下工具栏中控制读取 结果文件

另外,可在^{₩ Work Space: D:/ADI.SimWork4.0/HFSILab/\ ☑ 输入框中修改工作路 径。}

3.3 CFD计算前处理

3.3.1 气动文件导入

导入气动网格文件如下图所示:

 CFD Data_in 	6 	
File Format:	C Binary 🖲 ASCII	
Load Grid File:	ata/robin/robin_cfd.ugrid	<u></u>
Load BC File:	data/robin/robin_cfd.dat	<u></u>

图 8 气动网格数据导入

3.3.2 边界条件设置

在 **CFD Data_in** 中, 点击 **L**选择文件夹中的文件导入气动网格文件: 导 入气动网格文件, 信息栏显示面板上的流体网格Flow Grid界面会出现气动网格 的相关操作, 即修改边界条件。如下图所示, 使用鼠标右键点选边界名称, 用来 显示或隐藏此边界网格。使用鼠标左键点击边界名称时,选定了当前的边界网格, 此时被选定的边界网格颜色会由绿色变为黄色以示区别,选定当前边界网格之后,

需要对边界条件进行设置,	Boundary Type:	Inviscid Wall	*	下拉菜单中
点选边界条件,边界条件类	型有:			

关于YOZ平面的对称面Symmetry plane x plane only

关于XOZ平面的对称面Symmetry plane y plane only

关于XOY平面的对称面Symmetry plane z plane only

远场Farfield

固壁无滑移No-slip Wall

滑移壁面Inviscid Wall

周期边界Periodicity。

Flow Grid				
🗉 🌍 Grid : 7 patches	*	Boundary Type:	No-slip Wall	•
V ROBIN				
V INLET				
🛹 ВОТТОМ				
🛹 ТОР				
V OUTLET				
🛹 FRONT				
V BACK				

图 9 边界条件设置

3.4 模态法气动弹性计算前处理

需要导入结构模态分析文件和气动网格文件,然后将结构网格节点的模态插 值到计算模型气动网格节点上。

3.4.1 气动文件导入及边界设置

导入气动网格文件、结构模态文件和插值选项,如图 4.1所示:

CFD Data_in	🕕 CSD Data_in	Interpolation
Load Grid File:		<u> </u>
Load BC File:		<u> </u>
lf Grid Have Py	ramid Cell	
	Conver	t

图 10气动网格数据导入界面

在 **CFD Data_in** 中,点击 **L** 选择文件夹中的文件导入气动网格文件:导入气动网格文件,信息栏显示面板上的流体网格Flow Grid界面会出现气动网格的相关操作,即修改边界条件。如图 11所示,使用鼠标右键点选边界名称,用来显示或隐藏此边界网格。使用鼠标左键点击边界名称时,选定了当前的边界网格,此时被选定的边界网格颜色会由绿色变为黄色以示区别,选定当前边界网格

之后,需要对边界条件进行设置, 菜单中点选边界条件,边界条件类型有:关于YOZ平面的对称面Symmetry plane x plane only,关于XOZ平面的对称面Symmetry plane y plane only,关于XOY平面 的对称面Symmetry plane z plane only,远场Farfield,固壁无滑移No-slip Wall,滑 移壁面Inviscid Wall,周期边界Periodicity。一般情况下根据需要分析流场的类型,将模型表面边界条件设置为固壁无滑移No-slip Wall或滑移壁面Inviscid Wall,被 设置为固壁无滑移No-slip Wall或滑移壁面Inviscid Wall的边界可以被创建成气 动弹性分析体。



图 11边界名称

设置好边界条件,勾选Modal之后信息栏显示面板会弹出Part和Body的显示 创建界面。

I I Grid : 5 patches VING_TOP	Boundary Type: Inviscid Wall Setting Of Part	Setting Of Body
 ✓ WING_DOWN ✓ SYS ✓ TAIL ✓ FAR 		

图 12边界条件设置及创建分析体

网格读入后在Flow Grid界面可创建Part和Body,如图 13及图 14所示。有时 会将物面(不包括远场和对称面)分为若干个边界,根据模型表面,创建构成2 个body的多个part,这样有利于得到更好的插值效果,在创建body的时候可以根 据需求任意组合网格part进行气动弹性分析。

Boundary Type:	Inviscid Wal		*
Setting Of Part —	26		,
part_1 : TAIL WING	_TOP WING_DOV	WN	-
			-
T			F

图 13创建part界面

🔆 Create Body	Panel	X
Body Name:	body_1	
- Parts		×
part_1		<u>_</u>
		.
1		
OK	C	ancel

图 14创建body界面

设置好边界条件,并完成分析体的创建后,若要进行气弹计算,则需将结构 数据导入并进行插值。

3.4.2 结构模态数据导入

如图 15所示,这里提供两种模态方式,即有限元模态(Nastran)和散点模态 (Scatter),先介绍点选Nastran后怎么进行插值,点击 Configuration CSD, 会弹出 如图 16所示的界面,在Number of Modes填入需要插值的模态阶数(通常情况下 小于10,工程人员根据经验和实际情况确定)。点击 加载需要的.f06文件 和.bdf文件。



图 15有限元插值类型选择

Configuration CS	D	×
Body_1 Number of Modes: Load F06 File:		
Part_1		
<u>ОК</u>	1	Cancel

图 16结构文件输入界面

如果使用散点插值,则点选 Scatter,如图 17 所示,点击 Configuration CSD, 会弹出图 18 所示的窗口,在插值之前需加载散点坐标文件和结构模态文件。

🕕 CFD Data_in	🕕 CSD Data_in	(1) Interpolation		
CSD data type:	C Nastran (Scatter 		
Number of Body:	1			
Configuration CSD				
图 17散点类型插值选择				

🕼 Configuration CS	D	
part_1 Load Struct Coord File: Load Struct Mode File: Number of Modes: Mode Scale Factor:	1.0	<u></u>
ОК	Cancel	

图 18散点文件读取

软件中共提供了两种插值方法,分别是全局插值和局部插值,若不使用散点插值,则两种方法均可使用,通常情况下结构外形与气动外形较为吻合的使用局部插值(IIM),结构外形与气动外形相差较远的使用全局插值(RBF);若使用散点插值,则只能使用全局插值。插值方法选择图 19。

🕕 CFD Data_in	🕕 CSD Data_in	Interpolation
Method:	Inverse Isop	oarametric Ma 👻
	Contadial Base F	unction(RBF) -

图 19插值方法选择

选择局部插值不需要进行参数设置,若使用全局插值,则需要进行参数设置,参数设置面板图 20所示。

Configuration Ir	iterpolation	×
part_1		
Bounding Size:		
XLeng	jth 0.921719	
Y Leng	jth 1.43046	
Z Leng	jth 0.112556	
RBF Base Function:	TPS	•
Support Radius:	1.0	
Tolerance:	1e-008	
Tolerance:	1e-008	
OK	Canc	el

图 20全局插值参数设置

在图 19中Bounding Size 给出了三个方向的尺寸参考值, RBF base

Function给出了插值的几种方法,分别有TPS、WC0、WC2、WC4、WC6,Support Radius插值半径可根据上面给出的Bounding Size给出的参考值填写。Tolerance需要给出容差。

注意:

(1) 对于振型间断要采用分块插值,即分part插值解决,在此基础上,局部和 全局插值方法都可选用;

(2) 对于结构与气动外形不一致,建议采用RBF全局插值方法;

关于插值半径的选择,有以下参考建议:

对于模型长度单位用毫米的网格,放大半径因子取默认值1即可,对于模型 长度单位用米时,放大因子取0.001即可。一般的,如果出现局部插值不光滑, 多是由于结构散点局部变形本身不光滑引起,特别是薄板结构,在有约束的地方, 几个离散点在结构扭转时往往容易发生微小鼓包(应力集中导致);解决这些部 位不光滑的方法可以从结构模型入手,加密局部结构单元和节点约束,另外一种可以通过缩放RBF径向基来通过光顺解决。RBF的径向基函数如下式:

$$f(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} r_i^2 \log |r_i| + \gamma_3 z + \gamma_2 y + \gamma_1 x + \gamma_0 ,$$

其中 $r_i = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}{R}$, R为径向基缩放因子

RBF径向基函数是在平面上叠加了一个阶次介于2~3的曲面偶函数,此函数的性质如下图所示。



其在 $r = e^{-1/2} \approx 0.6065$ 时出现极值点,由于结构模态一般是光滑的,所以一般 取r>0.605部分的基函数拟合较好(界面上的插值半径放大因子support radius就是 调节径向基距离,使得r>0.60),但对于复杂变形(比如医学成像等)本身局部 的变形不可忽略时,不建议缩放径向基半径,可以通过加密局部变形处的样本点, 从而使得这些局部变形也能得到很好的插值效果。

3.4.3 模态插值结果查看

模态插值完成后可通过插值Interpolation面板中的操作选项进行模态插值结 果的查看。

在分析体选择Part Selection窗口中点选需要查看的Part,在模态列表Specified Mode窗口中点选查看各阶模态的插值结果,修改放大比例Scale和模态阶次选择 Display,如图 21中的两个窗口对结构网格模态和气动网格模态操作均有效。

15

Specified	Mo	de:	
Scale:	1		•
Display:		mode 1	
	-		-

图 21模态放大比例设置

如果进行结构网格模态和气动网格模态对比,在结构网格模态显示Structure Mode Display(见图 22)和气动网格模态显示Flow Mode Display(见图 23)界 面上操作。可视 Visibility:选项勾选开关 ^{Con} I On I 勾选之后,对应的模态会在主 显示界面上显示(见图 24),可以修改显示的颜色Color和显示类型Representation, 显示类型Representation有面Surface、网格形式Wireframe和点Point三种类型。

Visibility:	Г On
Color:	Red
Representation:	Wireframe

图 22 Structure Mode Display界面

图 23 Flow Mode Display界面



图 24 气动网格(绿)、结构模态(红)、气动网格模态(蓝)



图 25散点插值结果显示

如果气动网格模态连续性不好,在显示界面上放大查看时会出现类似凹坑或 尖刺突起,这种情况下模态用于气动弹性计算,很容易在计算过程中出现网格负 体积。出现这种情况时,可使用如图 26的模态光顺功能Smooth将气动网格节点 上的模态进行光顺,消除明显的凹坑或尖刺突起。

Min Dist.:	0.5
Iters:	100
	Apply



模态插值的时候,模型表面气动网格节点寻找的是距离节点最近的结构单元, 气动网格节点到结构单元的距离为d,这些网格节点对应的d会有一个最大值 d_{max} 存在, ^{Min Dist.} 的量级应与 d_{max} 接近,并小于 d_{max} ; ^{Iters:} 设置的是光顺时内迭代 次数,大部分模型使用光顺功能时,内迭代步数超过一定值之后,气动网格模态 基本就不会发生变化了,所以内迭代数设置在100左右即可。

3.5 FEM法气弹计算前处理

在导入模型气动网格设置好边界条件后,勾选FEM点击setting会弹出如图 27 所示的窗口,在Fluid Solid Interface下面的对话里选择流固耦合面,在Structure config对话框里配置结构数据,这里对结构的静气弹求解支持两种求解器:一种 是软件内置的求解器,一种是调用外部Nastran求解器,两种方法都需要读入结构 的bdf文件,如果使用默认求解器求解,则需要读入刚度文件,若使用Nastran求 解,则在使用的计算机上需要有能够运行的Nastran软件。Load Model File (.bdf):加载结构文件,Load Rigidity File (.pch):加载结构刚度文件,Load Nastran Solver (.exe):加载Nastran 求解器。

Setting of FEM Paramete	rs 🔀
Analysis Type:	E C Transient_AE
TAIL WING_TOP WING_DOWN	<u>-</u>
	<u>×</u>
- Structure Config	1
Load Interpolation File (.bdf):	E:/Project/SimWork/XXX
Solver: 🐨 Default	C Nastran
Load Rigidity File (.pch):	
ОК	Cancel

a. 静气弹计算默认结构求解器

Setting of FEM Paramete	ers 🔀
Analysis Type: 📀 Static_A	E C Transient_AE
- Fluid Solid Interface	
TAIL WING TOP	A
	<u>*</u>
Structure Config	
Load Interpolation File (.bdf):	E:/Project/SimWork/XXX
Solver: C Default	• Nastran
Load Model File (.bdf):	E:/Project/SimWork/XXX
Load Nastran Solver (.exe):	D:/MSC Software/MSC 1
	Inconsistent and the set of the set
ОК	Cancel

b. 静气弹计算Nastran结构求解器

😽 Setting of FEM Paramete	rs 🔀				
Analysis Type: C Static_A	E 📀 Transient_AE				
- Fluid Solid Interface	- Fluid Solid Interface				
TAIL WING TOP					
WING_DOWN					
	_				
	<u> </u>				
- Structure Config					
Load Interpolation File (.bdf):	E:/Project/SimWork/XXX				
Solver: C Default	Nastran				
Load Model File (.bdf):	E:/Project/SimWork/XXX				
Load Nastran Solver (eve):	D-MSC Software/MSC 1				
ОК	Cancel				

c. 动气弹计算结构Nastran求解器

图 27 FEM方法耦合面设置及结构求解器设置

3.6 计算参数设置

3.6.1 控制方程

1) eqn_type: 求解气体状态方程类型,包括:

可压缩理想气体(cal_perf_compress)

不可压缩理想热气体(cal_perf_incompress)

2) artificial_compress: 人工压缩性系数,默认值为15,当气体状态方程类型为不可压理想热气体时使用;

3) viscid_terms: 粘性项选择,包括:

无粘inviscid

层流laminar

湍流turbulent

- Governing Equations —		
Equation Type:	Cal_Perf_Incompress	•
	图 28 不可压缩控制方程	
Governing Equations —		
Equation Type:	Cal_Perf_Compress	•
	图 29 可压缩控制方程	
Artificial Compress:	15.00000000000	
	图 30 人工可压缩系数	
Viscid Terms:	Laminar	×
	图 31 层流选项	
Viscid Terms:	Turbulent	<u>•</u>
	图 32 湍流选项	
Viscid Terms:	Inviscid	

图 33 无粘选项

3.6.2 无粘通量

1) flux_limiter: 通量限制器, 共有六种限制器供选择(barth, venkat, minmod,

vanleer, vanalbada, smooth),不使用限制器时选择none;

2) first_order_iterations: 空间一阶格式迭代步数,0表示不开启一阶格式, 大于0表示开启一阶格式;

3) flux_construction: 设置选择通量格式,共有5种通量格式供选择(roe, vanleer, hllc, aufs, ldfss,),对于不可压流,只能使用roe格式。

注意:通量格式和通量限制器的选择对用户的理论基础和CFD经验要求较高,选择恰当的通量格式和通量限制器可得到更为精准的气动力计算结果。

Inviscid Flux Method		
Flux Limiter:	None	•
First Order Iterations:	0	
Flux Construction:	Roe	_

图 34 通量限制器参数设置

3.6.3 非线性求解参数

time_accuracy:时间离散格式(分为steady, 1st order, 2nd order, 2nd orderOPT, 3rd order,)。定常steady选择steady(无时间离散),

1st order为一阶时间向后差分格式

2nd order为二阶时间向后差分格式

2nd orderOPT为优化的二阶时间向后差分格式

3rd order为三阶时间差分格式

建议:由于一阶格式精度低,三阶格式稳定性较差,故一般推荐使用二阶格 式和优化的二阶格式。

2) pseudo_time_stepping: 定义是否使用虚时间步,默认开启,建议开启, 开启后时间步长改变在空间上依赖于当地CFL数的约束;

3) schedule_number: 表征在迭代过程中CFL数是否变化的标识符推荐值为2, 表示在计算过程中CFL按线性斜坡函数变化,以加快收敛速度;

4) schedule_iteration:确定CFL数的迭代或者子迭代数区间当时间精度 time_accuracy='steady'时,该参数决定伪时间项的CFL数。当时间精度 time_accuracy='unsteady'时,schedule_iteration中的第一个参数定义了第一次迭代 或者子迭代计算时的起始CFL数,其值必须是1,实际的CFL数按照线性变化规 则从schedule_iteration(1)时的schedule_cfl(1)直到schedule_iteration(2)时的schedule cfl(2),最终保持为schedule cfl(2)中的参数值不变。

5) schedule_cfl: 层流方程CFL数流场计算中调节收敛速度和确保数值稳定性的参数。其物理意义是计算依赖域要大于物理依赖域,以保证数值稳定性;分别为最小值和最大值。

6) schedule_cflturb: 湍流方程CFL数计算湍流方程的CFL数,分别为最小和 最大值。

7) Characteristic Physic time: 特征物理特征时间(有量纲量),可取为翼型 震荡周期,涡脱落周期,最高阶固有频率的时间等等,

8) Ref_sound Speed/ Ref velicity:参考声速/参考速度,可压缩计算时,输入参考声速,不可压缩时,输入参考速度。

9) Physical Ref length:物理参考长度,通常取弦长

10) Grid Ref_length: 网格参考长度,如果物理参考长度为1m,网格参考 长度以m为单位,则取1;如果网格参考长度以mm为单位,则取为1000

注意:参数7)-11)用于计算无量纲时间步,计算方法如下:

对于可压流动用公式: $\Delta t = T^* \frac{L_{ref}}{L_{ref}^*} a_{ref}^*$

对于不可压流动用公式: $\Delta t = T^* \frac{L_{ref}}{L_{ref}^*} u_{ref}^*$

其中 T^* 为可取为翼型震荡周期,涡脱落周期,最高阶固有频率的时间(如 T^* 取0.005s), L_{ref} 为将参考长度换算成气动网格单位时对应的值(如:物理参考 长度为0.254m,而气动网格为mm单位,那么将其换算成毫米单位时为254mm,故 L_{ref} 取254), L_{ref}^* 为真实参考长度, a_{ref}^* 为参考声速, L_{ref}^* 与 a_{ref}^* 的量纲要保持一致。

$$\Delta t = \mathrm{T}^* \frac{L_{ref}}{L_{ref}^*} \mathrm{a}_{ref}^* = 0.005 \frac{254}{0.254} 340 = 1700$$

11) subiterations:子迭代数,当时间精度time_accuracy设置为非steady项时, 需要设置子迭代数,子迭代数的设置影响子迭代是否收敛,过大的子迭代数会花 费更多时间来完成计算;

Nonlinear Solver Parameters			
Time Accuracy:	Second Order		_
Pseudo Time Stepping:	On		•
Schedule Number:	2		
Schedule Iteration:	1	50	
Schedule CFL:	200.000000000000	200.00000000000	
Schedule CFL Turbulence:	50.0000000000000	50.00000000000	
Characteristic Physical Time(s):	1		
Ref Sound Speed(m/s):	340		
Ref length of physical problem(m):	1		j
Corresponding Ref length in grid:	1		
Subiterations:	0		

(a) 控制方程为可压缩

Nonlinear Solver Parameters		
Time Accuracy:	Second Order	•
Pseudo Time Stepping:	On	•
Schedule Number:	2	
Schedule Iteration:	1 50	
Schedule CFL:	200.0000000000 200.0000000	000
Schedule CFL Turbulence:	50.000000000000000000000000000000000000	000
Characteristic Physical Time(s):	1	
Ref Freestream Speed(m/s):	10	
Ref length of physical problem(m):	1	
Corresponding Ref length in grid:	1	
Subiterations:	0	

(b) 控制方程为不可压缩

图 35 非线性求解参数

3.6.4 线性求解参数

1) meanflow_sweeps: 层流计算扫掠次数,在每个时间步上用Gauss-Seidel 方法求解离散后的流场代数方程组时,使用的子迭代步数;

2) turbulence_sweeps: 湍流计算扫掠次数,在每个时间步上用Gauss-Seidel 方法求解离散后的湍流方程组时,使用的子迭代步数。

Linear Solver Parameters	
Meanflow Sweeps:	15
Turbulence Sweeps:	10

图 36 线性求解参数设置

3.6.5 湍流模型选择

 湍流模型turb_model:设置湍流模型,共有5种湍流模型供选择(SA, DES, Menter-SST, Abid-KE, Hrles)。SA(Spalart-Allmaras)和DES(Detached-Eddy Simulation)是一方程模型,Menter-SST是两方程k-omega模型,Abid-KE是两方程 k-epsilon模型,Hrles是hybrid RANS-LES 湍流模型。

- Turbulent Diffusion Models		
Turbulence Model:	SA	

图 37 湍流模型选择

3.6.6 物理属性参数

- 1) temperature units: 温度单位制,有开尔文Kelvin和兰金温度Rankine两种;
- 2) temperature: 设置温度,根据温度单位和实际温度进行换算;
- 3) mach number: 设置马赫数;

4) reynolds_number: 设置雷诺数,此处注意长度单位制;输入雷诺数的计 算公式如下: Re = Re_{ref} / $L_{ref} = (\rho_{ref}^* U_{ref}^* L_{ref}^* / \mu_{ref}^*) / L_{ref}$,其中 ρ_{ref}^* 是自由来流密度, U_{ref}^* 是自由来流速度, L_{ref}^* 是物理参考长度(一般为平均气动弦长或直径), μ_{ref}^* 是分子粘性系数, L_{ref} 为气动网格对应的参考长度;

- 5) angle of attack: 设置气流来流方向与XY面的夹角,单位为度;
- 6) angle of yaw: 设置气流来流方向与XZ面的夹角,单位为度。

Reference Physical Properties		
Temperature Units:	Rankine	
Temperature:	491.4	
Reynolds Number:	1860000	
Angle of Attack:	0.000000000000E+000	1
Angle of Yaw:	0.000000000000E+000	
Mach Number:	0.02	

图 38物理属性参数设置

3.6.7 计算力、力矩系数参考物理量

1) area_reference: 参考面积, 根据模型实际的参考面积进行设置, 默认为1,

单位默认为 m^2 ,如果网格为毫米网格,此处需进行单位换算,1 m^2 =1000000 mm^2 ;

2) x_moment_length: X方向力矩参考长度,此处为X方向力矩系数计算时的参考长度,默认为1,单位默认为m,用户根据模型实际情况进行设置(一般填参考弦长),注意单位;

3) y_moment_length: Y方向力矩参考长度,此处为Y方向力矩系数计算时的参考长度,默认为1,单位默认为m,用户根据模型实际情况进行设置(一般填参考展长),注意单位;

4) x_moment_center、y_moment_center、z_moment_center: 模型力矩参考点
 的坐标值,默认为(0,0,0),单位为*m*。

力、力矩系数参考物理量的设置根据模型的实际情况来完成,此处需要注意 的是,大部分网格均使用毫米作为单位,要注意单位换算。

Force Moment Integral Properties	\$	
Reference Area:	1.000000000000	
X Moment Length:	1.000000000000	
Y Moment Length:	1.000000000000	
X Moment Center:	0.000000000000000000000000000000000000	
Y Moment Center:	0.000000000000000000E+000	
Z Moment Center:	0.0000000000000E+000	

图 39力/力矩系数参考物理量设置

3.6.8 求解控制参数

1) steps: 设置求解计算的步数;

2) stopping_tolerance: 残差小于此数值时计算停止;

3) restart_write_freq: 设置续算文件的保存频率,例如每500计算步保存一次续算文件,则此处设置为500,续算文件后缀为".flow";

4) jacobian_eval_freq: 雅克比矩阵的更新频率,每隔设置的步数更新一次。

Code Run Control		-
Steps:	1801	
Stopping Tolerance:	1.00000000000000E-015	
Restart Write Frequency:	250	
Jacobian Eval Frequency:	10	

图 40求解控制参数

3.6.9 特殊参数

大角度修复large_angle_fix:选择是否启用大角度修复,on或off。当网格面单元上各边的夹角有大于或等于178度时,可能会出现粘性通量在网格单元内突然增大,导致NaN的错误报告,开启后可忽略粘性通量在此单元内的变化。一般情况下不用开启此功能,当网格质量较差时开启。

- Special Parameters	Parameters		
Large Angle Fix:	Off	•	

图 41 网格修复参数开关设置

3.6.10 物面/流场数据输出

计算过程中用户可设置在每若干计算步时保存物面(边界)/流场的参数, 用来进行流场分析或制作动态视频等,输出时以网格节点为单位输出,可以输出 的参数有:

velocity components (速度分量)

pressure (压力)

pressure coefficient (压力系数)

Mach number (马赫数)

entropy (熵)

components of vorticity (涡分量)

magnitude of vorticity (涡量幅值)

turbulent eddy viscosity(湍流涡粘性)

mass, momentum(3)and energy esiduals(质量、动量和能量残差)

turbulence residuals(湍流残差)。

Boundary Output Variables —		
Output Frequency:	[0	
Output Variables:	Velocity Components,Pressure,	
	Velocity Components Pressure	<u> </u>
		_
Volume Output Variables		
Output Frequency:	0	
Output Variables:	Velocity Components, Pressure,	
	Velocity Components Pressure	*
		<u></u>

图 42流场物理量输出控制参数

3.6.11 指定平面或者点数据输出

计算过程中用户设置指定平面或者指定点的数据输出。

Geometry Type: 选择平面输出

Center(x,y,z): 指定平面上某一点的坐标

Normal(x,y,z): 指定平面的法向矢量

Name: 指定平面名称

Frequency:平面数据输出频率

Geometry Type:	plane
Center(x,y,z):	0,0,0
Normal(x,y,z)/Radius:	0,0,0
Name:	
Frequency:	0

图 43 指定平面数据输出

Geometry Type: 选择边界点输出

Name: 指定输出点的名称

Frequency:指定输出点的频率

X:指定输出点的X坐标

Y:指定输出点的Y坐标

Z:指定输出点的Z坐标

Geometry Type:	boundary_points
Name:	×1556
Frequency:	1
X(x1,x2,):	1.556
Y(y1,y2,):	0.007
Z(z1,z2,):	0.073

图 44 指定点数据输出

3.6.12 高级参数设置

Freeze_Limiter: 勾选该选项后,可冻结基于节点的通量限制器,一般在高超 声速计算时使用。

temporal error control: 用于控制时间精度误差,一般推荐使用缺省值。

Low_Mach_Precondition: 低马赫数预处理,在一些低速流动问题中,如飞 机的着陆工作状态下,同时包括了可压和不可压的流动区域,这个时候通常选择 可压缩方程来作为流动的控制方程。在低马赫数条件下,传统的求解可压流的方 法不能得到令人满意的结果。低速预处理方法通过在控制方程时间导数项上乘以 预处理矩阵,使方程的所有特征值都在同一量级,从而避免低速流场求解的刚性 问题(仅在通量格式为Roe格式时使用)。

Swap_Y-Z Axes: 交换Y-Z轴,通过旋转操作,交换网格Y轴与Z轴,便于迎角和升力的计算。

Ignore_Euler_Number: 忽略欧拉数,在拓扑学中,欧拉数反映了节点数、单元数的一致性和连续性。如果欧拉数检查结果失败,表明网格质量较差,将影响流场仿真结果的准确性,勾选该命令时,将忽略欧拉数一致性检查,一般不推荐。

面数据欧拉数满足方程: $EN_b = N_b - E_b + F$,其中 N_b 为边界节点数(boundary nodes), E_b 为边界棱数(boundary edges), F_b 为边界面数(boundary faces)。

体数据欧拉数满足方程: $EN_v = 2(N - E + F - C)$,其中N为体节点数(volume nodes), E为体棱数(volume edges), F为体面数(volume faces), C为体单元数

(volume cells)

Ignore_Negative_Volume: 忽略负体积,由于网格质量差或者参数设置不合理,均可能导致计算过程中出现负体积报错提示,勾选该命令以后,可以保证计算正常完成。

图 45高级参数设置一

Noninertial Reference Frame: 勾选后采用旋转坐标系的方法,可用于计算旋 翼悬停状态气动力

Specifying Alternate Freestream: 勾选后,可修改来流马赫数

Noninertial Ref Frame				
Coordinate of Rotation Vecto	n: 0	0	1	
Component of Rotation Rate	: 1	0	0	

图 46 高级参数设置二