SimArk Particles V1.0 用户使用手册

珠海市数舟科技有限公司

2022年12月

1.	软件产	[×] 品概要	1
	1.1.	软件功能概要	1
		1.1.1. 粒子生成器	1
		1.1.2. 求解器	1
		1.1.3. 后处理	2
	1.2.	软件使用流程	2
	1.3.	软件产品标识	3
	1.4.	软件启动与注册	3
		1.4.1. 软件启动	3
		1.4.2. 软件注册	3
	1.5.	联系我们	3
2.	用户界	早面	.4
	2.1.	用户界面组成	4
	2.2.	颜色主题	5
	2.3.	鼠标操作	6
3.	文件抄	操作	.8
	3.1.	文件格式说明	8
	3.2.	新建 case	.8
	3.3.	打开	9
	3.4.	保存1	0
	3.5.	另存为1	1
	3.6.	导入1	1
	3.7.	导出1	2
	3.8.	文件管理1	.3
4.	几何.		.5
	4.1.	几何导入1	.5
	4.2.	入口几何创建1	.5
	4.3.	几何从属创建1	7
5.	粒子生	上成1	9
	5.1.	粒子生成器 UI 界面1	9
	5.2.	粒子半径2	21
	5.3.	粒子生成方法2	22
	5.4.	粒子显示2	22
	5.5.	几何贴体粒子排布2	24
	5.6.	多核 CPU 并行 2	25
	5.7.	内存占用度2	26
	5.8.	容差判定2	26
	5.9.	内部粒子扣除2	27
	5.10	. 液体粒子填充2	28
6.	计算道	2置和求解3	32
	6.1.	材料3	32
	6.2.	部件 Zone	85

目录

	6.3.	运动设置	37
	6.4.	自由运动 6DOF	42
	6.5.	部件从属运动	45
	6.6.	边界条件	46
	6.7.	计算域	48
	6.8.	重力	50
	6.9.	物理模型	50
	6.10). 求解设置	51
	6.11	. 提交计算	53
7.	数据周	后处理	56
	7.1.	后处理界面	56
	7.2.	粒子结果文件加载	59
	7.3.	云图渲染	62
	7.4.	切面	63
	7.5.	动画	66
	7.6.	Mapping	67
	7.7.	2D 图表	67
8.	求解暑	器精度验证	70
	8.1.	与实验对比验证	70
		8.1.1. 3D 溃坝	70
		8.1.2. 圆柱体自由入水	72
		8.1.3. 波浪拍打平板	73
	8.2.	与商业软件对比验证	76
		8.2.1. 整车涉水	76
		8.2.2. 齿轮箱搅油润滑	79
	8.3.	与网格法对比验证	81
		8.3.1. 救生艇自由入水	81
		8.3.2. 飞行器水面迫降	83

1. 软件产品概要

SimArk Particles 是一款基于 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics, 光滑粒子流体 动力学)的无网格粒子法仿真软件。是由珠海市数舟科技有限公司开发,核心代码自主 可控。

SimArk Particles 软件用于准确高效分析产品中真实的复杂的液体(如水和油)物理 行为。它广泛应用于变速器和发动机润滑、车辆涉水、通信设备防水、飞机水上降落、 洗碗机清洗等场景的液体问题分析。

SimArk Particles 软件具备前处理、求解器和后处理三个模块。

1.1. 软件功能概要

1.1.1. 粒子生成器

粒子生成器是 SimArk Particles 软件的前处理模块,将几何离散生成粒子文件,为求解器提供输入文件。

- 几何读入: STL 格式
- 三种粒子生成方法
- 单部件粒子生成
- 多部件粒子生成
- 正交排布粒子生成
- 几何贴体排布粒子生成
- 均一粒径粒子生成
- 液体粒子填充生成
- 内部粒子扣除
- CPU 并行

1.1.2. 求解器

SimArk Particles 软件采用 SPH 求解器,数值求解 Navier-Stokes 方程组,加入密度

耗散项以缓和压力振荡问题,加入人工粘性项以提高数值稳定性,采用四阶龙格库塔法 (RK4)进行时间积分保证保证数值模拟的精确性和稳定性。

- 高精度求解牛顿流体流动
- 便捷的运动定义
- 6DOF 模型
- 入口边界条件
- 表面张力模型
- 变量监控
- CPU 并行
- GPU 加速

1.1.3. 后处理

SimArk Particles 软件提供丰富的流场可视化功能对计算结果进行分析。

- 云图渲染
- 切面
- 动画
- Mapping
- 流量统计
- 2D 图表

1.2. 软件使用流程

SimArk Particles 软件的基本使用流程如下:

- (1) 启动软件,在用户界面导入 STL 格式的几何文件;
- (2) 生成粒子文件:设置粒子半径、选择一种粒子生成方法、设置多核 CPU 并行、 设置粒子是否几何贴体排布、设置液体粒子填充等;
- (3) 设置流体材料属性;
- (4) 创建并设置 case: 设置部件材料和运动、边界条件、计算域、重力、物理模型、 保存频率等参数;
- (5) 启动求解器进行求解;

- (6) 计算过程中或者计算结束后,对计算结果进行统计分析以及物理场可视化渲染;
- (7) 保存并退出软件。

1.3. 软件产品标识

软件名称:	SimArk Particles 无网格粒子法仿真软件
版本号:	V1.0
简称:	SimArk Particles

1.4. 软件启动与注册

1.4.1. 软件启动

用户可以通过以下四种方式启动 SimArk Particles 软件界面。

- (1) 双击系统桌面上的 SimArk Particles 软件快捷图标;
- (2) 点击系统程序菜单栏中的 SimArk Particles 软件链接;
- (3) 在软件的安装目录下找到 SimArk.exe 并双击打开;
- (4) 在系统命令窗口(cmd)中进入 SimArk Particles 软件安装目录后, 输入 SimArk 并回车。

1.4.2. 软件注册

首先,安装 license 用户工具-Virbox 软件。

用户可自由选择"在线激活"或"离线激活"中的任何一种形式完成 license 注册。 具体操作,请参考文档《license 用户工具安装激活说明.pdf》。

1.5. 联系我们

Tel: 86--756-3666916

Fax: 86--756-3666916

Website: www.simark.cn

地址:广东省珠海市高新区唐家湾港湾1号湾10栋602房(519080)

2. 用户界面

SimArk Particles 软件用户界面(User Interface, UI)如下图 1所示。

2.1. 用户界面组成

- (1) 菜单栏: 包含 "File" 、 "Home" 和 "3D Render" 菜单项。
- (2) 工具栏:提供文件新建、保存、视图、显示、创建粒子、求解等相关的操作图标。用户点击相应的图标,可在弹出设置框设置相关参数,或者启动求解器进行仿真计算。
- (3) 控制面板 Control Panel: 以"树"结构形式展示当前工程项目的设置信息,包含了几何、粒子、材料、部件 Zone、边界条件、计算域、重力、物理模型、求解设置、计算等。
- (4) 属性面板 Settings: 当选择控制面板中的设置时, Settings 面板显示相应的属性, 用户可以设置相关的属性值。
- (5) 图形显示区:最大的一块区域,显示导入的几何、生成的粒子文件、结果云图等。
- (6) 信息面板 Console: 记录并显示人机交互的信息,或者输出仿真过程中相关统 计数据。
- (7) 进度面板 Process: 当提交计算后,显示软件当前正确求解中。当计算完成后, 提示求解完毕。



图 1 SimArk Particles 软件用户界面

2.2. 颜色主题

软件提供两款颜色主题的界面配色,分别是浅白色和深黑色主题。可以点击菜单栏 "File"→"Theme",然后选择"Dark Theme"或者"Light Theme"。Light Theme 主 题软件界面如图 2 所示,是默认的颜色主题。Dark Theme 主题软件界面如图 3 所示。



图 2 Light Theme 主题软件界面

He y Home		· ·
New Case Open Project Save Project Run Script Export Script	Image: Second	Chaplay Canadam Ponter Create Particle Solve 2D Graph 3D Plot
Control Panel	Pre-Win	dow
Geometry		
Particles Generation		SimArk
🚯 Materials		Panicies
🔽 🗉 Case		
▼ Case_1		
🗊 Zone		
💕 Boundary Condition		
Domain		
Gravity		
Physical Model		
Solver Setting		
Run		
Post		
Sattinge		
Name Value		
Value Value		
	Console	rocess

图 3 Dark Theme 主题软件界面

2.3. 鼠标操作

鼠标对图形显示区的操作包括图形缩小、放大、平移、旋转: 图形缩小操作:鼠标放置在图形显示区上,鼠标中键往后滚动。 图形放大操作:鼠标放置在图形显示区上,鼠标中键往前滚动。 图形平移操作:鼠标放置在图形显示区上,鼠标按下中键移动。 图形旋转操作:鼠标放置在图形显示区上,鼠标按下左键移动。

鼠标放置在图形显示区上,点击右键,提供对图形的预设置的便捷操作,包括:"Hide select item"、"Hide other item"、"Show All"、"ISO view"、"Default view"、 "Curser mode"、"Fit View"、"View Direction"、"Create Set"、"Select all"、 "Display Point"、"Dispaly Curve"、"Display Face"、"Display Gaussian Point"和 "Dispaly WireFrame",如图 4 所示。

Pre-Window	3D Graph	
	Sil P Hide select item	m Ark articles
UUUTITI CARE	Hide other item	
A AND THE REAL	Show All	
	ISO view	
Territe	Default view	
ARREN S THE	Curser mode	
	Fit View	
	View Direction	
	Create Set	
	Select all	
	Display Point	
	Display Curve	
	Display Face	
	Display Gaussian Point	
	Display WireFrame	

图 4 图形显示区右键功能菜单

3. 文件操作

SimArk Particles 软件的文件操作功能包括:新建 case、打开、保存、另存为、导入、导出、文件管理。

3.1. 文件格式说明

SimArk Particles 软件涉及到如下文件:

- (1) 几何文件: SimArk Particles 软件只支持.stl 格式的几何文件导入,便于粒子生成器将几何离散为粒子。
- (2) .sak 项目文件: SimArk Particles 软件将用户定义的仿真项目,保存为.sak 后缀 的文件,以便用户下次打开、修改设置或提交仿真计算。
- (3) .dat 数据文件: SimArk Particles 软件将生成的粒子文件数据以及部件运动位移数据保存在.dat 文件中,供求解器作为输入文件进行求解。
- (4) .pts 数据文件: SimArk Particles 软件将生成的粒子文件数据也保存在.pts 文件 中,便于后处理可视化显示粒子文件。
- (5) .vtk 数据文件: SimArk Particles 软件将仿真计算结果保存在.vtk 文件中, 默认的结果保存格式,以便用户在可视化窗口中进行后处理云图渲染等。
- (6) .plt 数据文件: SimArk Particles 软件也可以将仿真计算结果保存在.plt 文件中。

3.2. 新建 case

■ 功能描述

"新建 case"功能为新建一个仿真算例。当点击"新建 case"后,弹出命名窗口如 图 5 所示,控制面板 Control Panel 的树目录 case 节点下新增了这个被命名的算例设置。 SimArk Particles 软件支持一个 project 下创建多个 case,当继续点击"新建 case"后, 弹出命名窗口,控制面板 Control Panel 的树目录 case 节点下新增了这个被命名的算例设 置,与第一个命名的算例并列存在,如图 6 所示为创建了 2 个 case 的控制面板 Control Panel 树目录。

■ 操作步骤

8

选择"File"菜单栏中的"New Case"选项,或者点击工具栏的"1"按钮图标,

或者控制面板 Control Panel 的 "Case" 节点右键选择 "Creat Case", 创建一个新的 case。

Name:	Case_3		
Type:	SPH		,
		Cancel	ОК

图 5 新建 case 对话框

Con	itro	l Panel			
		Analysis	Post		
•	Geometry				
	۲	Shape			
•	Particles Generation				
	•	Particle			
		🗹 🏥 cycle(1)			
	*	Materials			
•	Ē	Case			
	Ŧ	Case_1			
		Tone Zone			
		Boundary Condition	on		
		Domain			
	Gravity				
	Physical Model Solver Setting				
		Run			
		Post			
	•	Case_2			
		Tone Zone			
		Boundary Condition	on		
		Domain			
		Gravity			
		Physical Model			
		Solver Setting			
		Run			
		Post			

图 6 创建了 2 个 case 的控制面板 Control Panel 树目录

3.3. 打开

■ 功能描述

打开.sak 项目文件。

■ 操作步骤

选择"File"菜单栏中的"Open Project"选项,或者点击工具栏的" 2" 按钮图标,弹出图 7 对话框。导航并选择一个.sak项目文件,然后点击"打开"按钮,即可将该.sak项目文件加载到软件中。

÷ > ~ ^ 📁	« work (D:) > test >	save 🗸	C 在 save 中	捜索の
组织 ▼ 新建文件夹				≣ - □
📮 此电脑	名称 ^	修改日期	类型	大小
> 🏪 Windows (C:)	car_files	2022/12/15 9:03	文件夹	
> 🕳 work (D:)	injection_files	2022/12/9 16:40	文件夹	
> 🕳 新加卷 (E:)	🗋 car.sak	2022/12/15 9:03	SAK 文件	23,367 KB
🛬 网络	injection.sak	2022/12/9 16:40	SAK 文件	525 KB
文件名	(N): injection.sak		→ Project fil	e(*.sak)

图 7 打开项目文件对话框

3.4. 保存

■ 功能描述

保存当前项目文件信息,便于以后使用和分析。

■ 操作步骤

选择"File"菜单栏中的"Save Project"选项,或者点击工具栏的"[•]"按钮图标, 软件将对当前打开的项目进行保存。如果当前仿真项目尚未被保存过,将弹出如图 8 所示的"Save Project As"对话框,用户指定保存的文件路径和文件名后,点击"保存 (S)"按钮,即可输出该.sak项目文件。如果当前仿真项目已经被保存过,软件会自 动更新保存到相应的.sak项目文件中。

😚 Save Project As				×
$\leftrightarrow \rightarrow \checkmark \uparrow$	« work (D:) > test >	save 🗸	C 在 save 中	健素 ク
组织 ▼ 新建文件夹				≣ • ()
- 📮 此电脑	名称 ^	修改日期	类型	大小
> 🏪 Windows (C:)	📒 car_files	2022/12/15 9:03	文件夹	
> 🕳 work (D:)	injection_files	2022/12/9 16:40	文件夹	
> 🕳 新加卷 (E:)	🗋 car.sak	2022/12/15 9:03	SAK 文件	23,367 KB
> 🛬 网络	injection.sak	2022/12/9 16:40	SAK 文件	525 KB
文件名(N): proje	ect1			~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
保存类型(T): Proje	ct file(*.sak)			v

图 8 保存对话框

3.5. 另存为

■ 功能描述

将当前操作的仿真设置,另存为其他名称的.sak项目文件。

■ 操作步骤

选择"File"菜单栏中的"Save As"选项,在弹出如图 8 所示对话框指定保存的文件路径和文件名后,点击"保存(S)"按钮即可。

3.6. 导入

■ 功能描述

导入.stl 格式的几何文件到软件。

■ 操作步骤

控制面板 Control Panel 的"Geometry"→"Shape"节点右键选择"Import Geometry", 打开如图 9所示的对话框,选择单个.stl 几何或者按下键盘 Ctrl 键同时选择多个.stl 几何, 然后点击"打开"按钮,相应的几何导入到了软件中,如图 10 所示。

点击 Control Panel 面板下导入的几何,在其 Settings 面板中可以设置几何的透明度 "Opacity (%)",默认值是 100,即不透明。

11

组织 ▼ 新建文件夹	$\leftrightarrow \rightarrow \sim \uparrow$	≪ test → geometry	~ C	在 geometry 中搜索	م
▲ 此电脑 名称 修改日期 类型 > Windows (C:) □ ccc(2).stl 2022/7/29 15:25 STL 文件 □ ccc(3).stl 2022/7/29 15:25 STL 文件 □ ccc(3).stl 2022/7/29 15:25 STL 文件 □ ccc.stl 2022/7/29 15:25 STL 文件 □ gear.stl 2022/7/18 15:36 STL 文件 □ gearbox.stl 2022/7/18 15:36 STL 文件 □ liquid.stl 2022/7/18 15:36 STL 文件	组织 ▼ 新建文件夹			≣ •	• • •
 > — work (D:) > — 新加卷 (E:) > ● 新加卷 (E:) > ● 副本 2022/7/29 15:25 2022/7/29 15:25 2022/7/29 15:25 2022/7/18 15:36 	✓ 📮 此电脑 > 🏪 Windows (C:)	名称 ^]] ccc(2).stl	作 2	险日期 022/7/29 15:25	类型 STL 文件
→ 筆 网络 2022/7/18 15:36 STL 文件 2022/7/18 15:36 STL 文件 2022/7/18 15:36 STL 文件 1 liquid.st 2022/7/18 15:36 STL 文件	> — work (D:)	ccc(3).stl	2	022/7/29 15:25 022/7/29 15:25	STL 文件 STL 文件
☐ liquid.stl 2022/7/18 15:36 STL 文件	> 🦉 网络	gear.stl	2	022/7/18 15:36 022/7/18 15:36	STL 文件 STL 文件
		liquid.stl	2	022/7/18 15:36	STL 文件





图 10 导入几何模型

3.7. 导出

■ 功能描述

将仿真计算结果保存为特定格式的数据文件,供 SimArk Particles 软件或者第三方 软件使用。SimArk Particles 软件可以导出 Paraview 软件支持的.vtk 格式和 Tecplot 软件 支持的.plt 格式。

■ 操作步骤

选中控制面板 Control Panel 的 "Case" → "Solver Setting" 节点,在其 Settings 面 板中,默认是 "Paraview Output"选项勾选,即默认将结果保存为.vtk 格式,如图 11 所示。如果需要将结果保存为.plt 格式,勾选 "Tecplot Output"选项。

Control Panel	
Analysis	Post
▼ 📲 Case	
▼ Case_1	
Tone 🕅	
Boundary Condition	
Domain	
Gravity	
Physical Model	
Solver Setting	
Run	
Post	
ettings	
Name	Value
Slip Coefficient	1
Coeff of Smoothing Length	1.25
Coeff of Maximum Particle Number	1
Physical Viscosity	
Tecplot Output	
Paraview Output	\mathbf{V}
Particle Shifting	
Tensile Instability Control	
Hydrophobic Wall	

图 11 结果文件导出设置

3.8. 文件管理

■ 功能描述

SimArk Particles 软件的仿真项目文件的管理。项目文件保存为.sak 格式文件以及一个相同项目名称的_files 文件夹,如图 12 所示。在_files 文件夹里面,包含一个 "GeometryFiles"文件夹,保存项目相关的几何文件;一个 "ParticleFiles"文件夹,保存项目离散几何生成的粒子文件;还有一个或者多个(如果一个项目中创建了多个 case)

创建 case 名称的文件夹,如图 12 为只创建了一个名为"car"的 case,那么项目文件夹 中存在一个"car"的文件夹,保存所有和"car"这个 case 相关的设置信息和结果文件。 "car"的 case 文件夹中包含了"Input"文件夹和"Onput"文件夹,其中"Input"文件 夹存在和"car"这个 case 相关的粒子文件和运动描述文件,"Onput"文件夹是计算结 果输出文件夹。"Onput"文件夹包含了"monitor"、"particle"和"reboot"三个文件 夹和一个日记文件"log.dat"。其中,"monitor"文件夹放置求解过程中的监控数据, "particle"文件夹放置仿真结果文件,"reboot"文件夹放置续算的信息文件。

■ 操作步骤

依照保存的路径打开项目文件夹或者在 SimArk Particles 软件控制面板 Control Panel 的创建的 case 节点右键,选择 "Open Directory" 打开项目文件夹。



图 12 SimArk Particles 软件的文件架构

4. 几何

将几何导入到 SimArk Particles 软件中,为了顺利将几何文件离散生成粒子文件, 对导入的几何有格式要求。

对于入口的二维几何平面, SimArk Particles 软件提供入口几何生成功能, 软件支持 生成圆形和矩形的入口二维几何平面, 不支持导入二维几何平面用作入口边界。

对于导入的多个零部件, SimArk Particles 软件支持创建零部件之间的从属关系的装 配层次结构。

4.1. 几何导入

■ 功能描述

导入.stl 格式的几何文件到软件。

■ 操作步骤

参考 3.6 章节的"导入"。

4.2. 入口几何创建

■ 功能描述

创建入口的二维几何平面,SimArk Particles 软件提供入口几何生成功能,支持生成圆形和矩形的入口二维几何平面,不支持导入二维几何平面用作入口边界。

■ 操作步骤

点击 Control Panel 面板→Geometry→Shape, 右键选择"Create inlet", 在 Settings 面板中"Inlet Shape"选择入口形状是圆形还是矩形,图 13 所示。同时,在"Shape" 节点下新建了命名为"inlet_1"的入口几何,右键此几何,可以重命名 Rename 或者删除 Delete。

ettings	
Name	Value
Basic Property	
Visible	true
Name	inlet_1
Parameter	
Opacity(%)	100
Inlet Shape	Rectangle
Width	0.01
Height	0.01
CCW Rotate Angle(degree)	45
Center Position	
x	0
Y	0.1
Z	0
🖻 Normal	
Normal X	1
Normal Y	0
Normal Z	0

图 13 入口几何 Settings 对话框

矩形入口几何创建:在 Settings 面板中"Inlet Shape"选择"Rectangle",创建矩形入口二维平面,是默认的入口几何形状,如图 13 所示。可以设置的参数包括透明度 Opacity(%)、宽 Width、长 Height、旋转角度 CCW Rotate Angle(degree)、中心点 坐标 Center Position 和法向 Normal。



图 14 CCW Rotate Angle(degree)为 0(左图)和 45(右图)示意图

圆形入口几何创建:在 Settings 面板中"Inlet Shape"选择"Circle",创建圆形入口二维平面,如图 15。可以设置的参数包括透明度 Opacity(%)、半径 Radius、中心 点坐标 Center Position 和法向 Normal。

Name	Value			
Basic Property				
Visible	true			
Name	inlet_1			
Parameter				
Opacity(%)	100			
Inlet Shape	Circle			
Radius	0.01			
Center Position				
х	0			
Υ	0.1			
Z	0			
🗉 Normal				
Normal X	1			
Normal Y	0			
Normal Z	0			

图 15 圆形入口几何 Settings 对话框



图 16 创建圆形入口几何

4.3. 几何从属创建

■ 功能描述

SimArk Particles 软件支持导入的多个零部件,创建零部件之间的从属关系的装配层次结构,定义零部件之间的约束关系,便于运动属性的继承。软件支持创建多级的从属关系。

■ 操作步骤

点击 Control Panel 面板→Geometry→Shape 节点的一个零部件,不要松开鼠标,拖 拉其到另外一个零部件名称上方,然后松开鼠标,此时该零部件位于另外一个零部件的 下方,如图图 17 所示,创建了两级的从属关系。



图 17 几何零部件从属关系创建示意图

5. 粒子生成

当几何导入到 SimArk Particles 软件的后,需要将几何离散为粒子,为求解器提供输入文件。SimArk Particles 软件提供了粒子生成器,可高效将几何离散生成相应的粒子文件。

5.1. 粒子生成器 UI 界面

■ 功能描述

SimArk Particles 软件的粒子生成 UI 界面,设置粒子生成的参数。

■ 操作步骤

点击工具栏的"^{IIII}"创建粒子按钮图标,打开如图 18 所示的 Build Particle 对话框。 当粒子生成后, Control Panel 面板树目录的 Particle 节点下,列出并显示和几何名称一样的粒子文件便于管理,如图 19。取消粒子文件前面的打钩,则表示隐藏,在图形显示区不显示相应的粒子文件。

uild Particle		
Particle Radius		
Radius:	0.020000	¢
Method Triple ray-casting metho Single ray-casting metho Particle-by-particle judg	d od ement method	
Options		
CPU cores	1	-
Memory factor	0.70	\$
Body fitting optimization		
Factor for body fitting		
X 0.80 🗘 Y	0.80 🗘 Z 0.8	80 🌻
Tolerance	1e-6	
Overlap Tolerance	1e-6	
Same Coordinate Tolerance	1e-6	
Geometry Setting		
ccc(2).stl		•
-		
Hallow		

图 18 粒子生成器对话框



图 19 粒子生成后 Control Panel 面板树目录粒子管理

5.2. 粒子半径

■ 功能描述

用户设置粒子半径大小后,将用此粒子半径大小的粒子填充几何,生成均一粒径的 粒子。粒子半径越大,生成的粒子数量越少;粒子半径越小,生成的粒子数量越多。

图 20 和图 21 分别采用粒子半径 0.01 米和 0.005 米对汽车几何模型进行离散生成 粒子的效果。

■ 操作步骤

在粒子生成器对话框图 18 中,输入"Radius"的值,单位是米,然后点击"OK" 生成粒子。



图 20 粒子半径为 0.01m 离散汽车模型



图 21 粒子半径为 0.005m 离散汽车模型

5.3. 粒子生成方法

■ 功能描述

SimArk Particles 软件提供三种粒子生成方法,分别是 Triple ray-casting method、 Single ray-casting method 和 Particle-by-particle judgement method。

Triple ray-casting method: 基于三射线法生成粒子,软件默认的粒子生成方法,粒子贴体调整功能最佳。

Single ray-casting method: 基于单射线法生成粒子,产生正交粒子速度最快,但粒子贴体调整功能欠佳。

Particle-by-particle judgement method: 基于逐个粒子判断法生成粒子,产生正交粒子效率最低,没有粒子贴体调整功能,但对部分几何的适配性较好。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框, Method 选项中选择三种方法之一。

5.4. 粒子显示

■ 功能描述

在图形显示区可视化显示粒子文件。

■ 操作步骤

点击打开工具栏的"♀" Display Face 按钮图标,则在图形显示区显示几何如图 22 所示。在 Control Panel 面板中选中几何,在相应的 Settings 面板可以设置透明度"Opacity (%)"值,默认是 100。

点击打开工具栏的"[●]" Display Gaussian Point 按钮图标,则在图形显示区显示粒 子文件如图 23 所示。在 Control Panel 面板中选中粒子文件,在相应的 Settings 面板可 以查看相应部件粒子文件的粒子数量"Number of nodes"。

同时打开工具栏的 Display Face 按钮图标和 Display Gaussian Point 按钮图标,则同时显示几何和粒子,如图 24 所示。



图 22 只显示几何



图 23 只显示粒子文件



图 24 同时显示几何和粒子文件

5.5. 几何贴体粒子排布

■ 功能描述

SimArk Particles 软件默认生成的是正交排布粒子。如果几何存在曲面,在曲面边界 处存在半个粒子的误差,提供粒子几何贴体排布算法,使得粒子紧贴几何边界。如图 25 所示,在未进行贴体操作前,颗粒排列为完全正交排列,粒子在边界处不光滑,存在明 显的锯齿状,有半个粒子误差。由图 26 所示,进行了粒子贴体操作后,粒子在空间的 排布更均匀,粒子紧贴壁面,没有超出几何边界。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框,提供选项"Body fitting optimization"。默认 是不勾选,生成正交排布粒子如图 25 所示;若勾选,则生成几何贴体排布的粒子如图 26 所示。

当勾选了选项"Body fitting optimization"后, "Factor for body fitting"输入项起作用。"Factor for body fitting"为粒子贴体优化调整因子,包含3个分量,分别表示X、Y、Z 三个方向的调整优化因子,在0-1之间,默认为0.8,仅对粒子生成方法Triple

24

ray-casting method 起作用。



图 26 粒子几何贴体排布 (球形面透明显示)

5.6. 多核 CPU 并行

■ 功能描述

粒子生成器采用 OpenMP 进行核心代码的并行加速,生成百千万单元级的等直径球 形粒子仅需要数十秒的时间。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框,在"CPU cores"选项中设置需要 CPU 并行

线程数。必须输入大于0的整数,默认为1,最大值为系统最大核心数,对三种粒子生成方法均起作用。

5.7. 内存占用度

■ 功能描述

占用多少内存用来生成粒子。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框,在"Memory factor"选项中设置内存占用度, 大于 0 小于 1,默认 0.7(即占用 70%内存),对三种粒子生成方法均起作用。

5.8. 容差判定

■ 功能描述

SimArk Particles 软件的粒子生成器,提供3个容差控制,判定颗粒位置和几何实体面的容差。分别是"Tolerance"、"Overlap Tolerance"和"Same Coordinate Tolerance"。

"Tolerance":颗粒位于实体面内的判定容差,大于 0.0,默认值为 1e-6,单位米。

"Overlap Tolerance":两个独立的体,判定面是否交叉的容差,默认值为 1e-6, 单位米。

"Same Coordinate Tolerance":两个颗粒是否为同一个颗粒的容差,默认值为 1e-6, 单位米。

三个容差的默认值,对于绝大多数的几何是适用的。对于一些特殊装配体,如存在装配间隙或者几何质量不高情况,如图 27,当生成粒子后,部分粒子错误分配给到了齿轮上如图 28 所示,OverlapTol 默认值修改为 1e-3,重新生成粒子如图 29,没有出现粒子分配错误了。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框,在"Tolerance"、"Overlap Tolerance"和"Same Coordinate Tolerance"输入框进行设置。

26



图 27 齿轮几何装配体



图 28 粒子生成(默认容差)



图 29 粒子生成(Overlap Tolerance 值修改为 1e-3)

5.9. 内部粒子扣除

■ 功能描述

对于选中需要内部扣除粒子的部件,只保留最外面的3层粒子,其余粒子删除。工 况不考虑传热等特殊现象时,固体部件粒子只保留表面的几层即可,多余的粒子可以删 掉,从而可以减少参与仿真的总粒子数,加快仿真。如图 30 所示的齿轮几何,采用粒子半径 0.5mm 划分生成粒子,默认生成粒子数量为 529142,采用内部粒子扣除则粒子数量为 284698。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框,在"Geometry Setting"选项中设置。选择需要扣除的几何部件,然后勾选 Hallow 选项;对于多个几何部件需要扣除,每个几何部件单独勾选 Hallow。



图 30 内部粒子扣除

5.10. 液体粒子填充

■ 功能描述

对于液体几何粒子,可以导入液体几何.stl 格式到 SimArk Particles 软件进行离散生成液体粒子。SimArk Particles 软件同时提供了液体粒子填充功能,可以按照填充高度或填充体积进行填充生成液体粒子,生成名为 Vacancy 的粒子文件。

■ 操作步骤

如图 18 所示的 Build Particle 对话框,在"Geometry Setting"选项中选定一个几何体,然后勾选"Fill",输入填充高度、填充体积及填充方向。按高度填充对话框如图 31 所示,填充效果如图 33 所示。按体积图 32 填充对话框如所示,填充效果如图 34 所示。

uild Par	ticle						>
Particle R	adius						
Radius:	Radius:			000			+
Method							
Triple	ray-casting me	t <mark>hod</mark>					
O Single	e ray-casting me	ethod					
O Partic	le-by-particle ju	udgemen	t method				
Options							
CPU core	5		5				*
Memory 1	actor		0.70				*
Body fitti	ng optimizatior	n					
Factor for	body fitting						
Х	0.80	Y	0.80	\$	Z	0.70	*
Tolerance	,	1e-0	16				
Overlap T	olerance	1e-0	16				
Same Coo	ordinate Tolerar	nce 1e-0	16				
Geometry	Setting						
cycle.stl							•
Hallo	w						
🗹 Fill							
Gravity di	rection						
x 0		Y O		Z	-1		
Fill type	Height						•
Fill value	0.2						m

图 31 按高度填充对话框

	ticle							>
Particle R	adius							
Radius:	Radius:			0.001000				
Method								
Triple	ray-casting m	etho	d					
O Single	e ray-casting m	netho	d					
O Partic	le-by-particle	judge	ement r	nethod				
Options								
CPU core	s			5				\$
Memory factor				0.70				
Body fittle		n						*
bouy nul	ng optimizatio							
Factor for	body fitting							
	0.00							
Х	0.80		Ŷ	0.80	•	Z	0.70	*
X Tolerance	0.80 -		ү 1e-06	0.80	•	Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T	olerance		Y 1e-06 1e-06	0.80	•	Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo	olerance	ance	ү 1e-06 1e-06 1e-06	0.80	•	Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometro	olerance	ance	ү 1e-06 1e-06 1e-06	0.80	-	Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometry cycle.stl	0.80 • olerance ordinate Tolera	ance	Y 1e-06 1e-06	0.80	-	Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometry cycle.stl	v Setting	ance	Y 1e-06 1e-06	0.80		Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometry cycle.stl Hallor	v Setting	ance	Y 1e-06 1e-06 1e-06	0.80	•	Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometry cycle.stl Hallor V Fill Gravity di	v.su v	ance	Y 1e-06 1e-06	0.80		Z	0.70	•
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometry cycle.stl Hallor Fill Gravity di X 0	v Setting w rection	ance Y 0	Y 1e-06 1e-06	0.80	Ţ	-1	0.70	
X Tolerance Overlap T Same Coc Geometry cycle.stl Hallor V Fill Gravity di X 0 Fill type	v.su v rolerance ordinate Tolera v Setting w rection	ance Y 0	Y 1e-06 1e-06	0.80	Z	-1	0.70	*
X Tolerance Overlap T Same Coo Geometry cycle.stl Hallor V Fill Gravity di X 0 Fill type	v Setting w Volume	Y 0	Y 1e-06 1e-06	0.80	Z	Z	0.70	•

图 32 按体积填充对话框



图 33 1m×1m×1m 的空腔, 填充方向 Y 轴负方向, 填充高度 0.6m



图 34 1m×1m×1m 的空腔,填充方向(-1,-1,-1),填充体积 0.5m3

6. 计算设置和求解

当粒子生成器生成粒子文件后,用户即可设置该仿真工程的各项参数,然后启动 SPH 求解器进行仿真计算。

需要设置的仿真参数包括:材料设置、部件设置、边界条件、计算域、重力、物理 模型、监控设置、求解设置、计算设置等。

6.1. 材料

■ 功能描述

设置材料赋予计算域。可以从软件的材料库中加载材料到当前的计算项目,也可以 自定义新材料加载到当前的计算项目。材料的属性设置如图 37包括: Artificial Sound Speed 人工声速、Artificial Viscosity 人工粘性系数、Density 密度、Kinematic Viscosity 运动粘性系数、Thermal conductivity 导热率、Adiabatic Index 绝热系数、Surface Tension 表面张力和 Saturation Pressure 饱和蒸气压,其中:

- 人工声速:大于 0 的浮点数,推荐值是 10~15 倍流场预估最大速度(预估最 大速度可取 1.0~1.5 倍流场特征速度)。
- (2) 人工粘性系数:大于 0 的浮点数,合理的人工粘性系数对 SPH 模拟结果影响 影响不大,并且能提高计算稳定性,前提是所模拟的问题是以惯性力为主导的, 粘性效应不明显。对于普通流固耦合问题取 0.01~0.03,对于涉及剧烈物理过 程的问题可取 0.1~0.15(飞机迫降、高速入水等)。
- (3) 运动粘性系数:大于 0 的浮点数,运动粘性系数是一个物性参数,按材料本 身的物性设置即可。
- (4) 绝热系数:大于 0 的浮点数,如果采用原始 Tait 方程求解压力,该参数可不 设置。如果采用线性 Tait 方程求解压力,该参数必须设置,对于液体一般取 7, 气体取 1.4。
- (5) 密度: 大于 0 的浮点数, 是一个物性参数, 按材料本身的物性设置即可。
- (6) 表面张力:如果不开启表面张力模型,改参数可不设置。如果开启了表面张力 模型,改参数是一个物性参数,按材料本身的物性设置即可。

- (7) 饱和蒸气压: 是一个物性参数, 按材料本身的物性设置即可。在 SimArk ParticlesV1.0 版本软件中, 可不设置改参数。
- (8) 导热率: 是一个物性参数, 按材料本身的物性设置即可。在 SimArk Particles V1.0 版本软件中, 可不设置改参数。

■ 操作步骤

右键 Control Panel 面板的"Materials",选择"Load From Material Lib"或者"Create Material"。

"Load From Material Lib":从软件的材料库中加载材料到当前计算项目,如图 35 所示。单击选择"Available"下的一种材料,然后点击">>"图标将此材料加入到"Selected" 下图 36,最后点击"OK"确认即可,材料成功加载到当前的计算项目图 37。

"Create Material": 自定义新材料加载到当前的计算项目,如图 38 所示。输入材料名称,点击"OK"确认即可,材料成功加载到当前的计算项目。

🐺 Load Material	×
Available:	Selected:
SeaWater Hyperelastic Mie-Gruneisen Oil Conductivity Ideal_Gas JWL Stiffen_Gas	>>
Mi Elastic	OK Cancel

图 35 加载材料对话框
🗃 Load Material		×
Available:	Select	ed:
SeaWater Hyperelastic Mie-Gruneisen Conductivity Ideal_Gas JWL	~	Oil
Stiffen_Gas	<<	OK Cancel





图 37 材料属性设置对话框



图 38 创建材料对话框

6.2. 部件 Zone

■ 功能描述

设置项目中每个部件的属性,包括 State of Matter 类型、Material 材料、Slip Cofficient 壁面滑移系数、Motion 运动方式(下一小节详细描述)。其中:

类型:是设置部件是固体还是流体。

材料:选择材料赋予部件。

壁面滑移系数:一个调整流体粒子和壁面之间粘度的参数,它补偿了由于壁面粗糙 度建模不当造成的问题。Slip condition = 0 为 free-slip 自由滑移条件; Slip condition = 1: non-slip 无滑移条件。默认值为 1.

■ 操作步骤

Control Panel 面板中单击"Zone"节点,然后鼠标右键,选择"Refresh",自动将 生成的粒子文件加载到"Zone"节点下面,如图 39。选择"Zone"节点下面的一个部 件,在 Settings 面板中设置 State of Matter 类型、Material 材料、Slip Cofficient 壁面滑移 系数等。

35

Post
งท
Value
Zone
1
gear01
Solid
Oil
1
Stationary
-1.398700e-04
0.031718
-2.244640e-04

图 39 部件 Zone 设置对话框(solid 部件)

Control Panel	
Analysis	Post
🗾 gear01	
🗐 liquid	
🗐 gear02	
gear03	
🗐 shell	
Settings	
Name	Value
Basic Property	
Name	Zone
ParticleID	2
ZoneName	liquid
🖻 Parameter	
State of Matter	Fluid
Material	Oil
Slip Coefficient	1
Flow Parent	
⊡ Stationary	
E Center Point	
x	-0.061502
Y	0.024518
Z	-0.065905

图 40 部件 Zone 设置对话框(fluid 部件)

6.3. 运动设置

■ 功能描述

设置部件的运动属性,在 SimArk Particles V1.0 版本软件中,只能考虑刚体运动。 软件支持 5 种运动方式: Stationary 静止、Translation 平移、Rotation 旋转、TransAndRota 平移旋转组合以及导入外部复杂运动路径文件 TableFile,如图 41。

■ 操作步骤

静止:选择"Zone"节点下面的一个部件→"Settings"面板→"Motion",选择 "Stationary",是部件运动的默认方式。

平移:选择"Zone"节点下面的一个部件→"Settings"面板→"Motion",选择 "Translation"。需要设置"Translation Direction"平移方向 X、Y、Z 或者 Table; "Pattern" 方式提供"Velocity(m/s)"和"Position"两种平移指定方式,如图 42。在"Velocity" 最右侧点击"-"图标,打开平移定义表格如图 43。表格第一列是时间,单位秒,第二 到第四列,分别是 xyz 方向的速度大小,单位由 "Pattern"确定。表格第一行输入的数 值必须是 0,如果行数不够,可以右键点击行号选择 "Insert Column At Below" 增加新 的一行,如果需要删除某行,右键对应的行号选择 "Delete Row";支持定义好的表格 数据导出 "Export"保存,或者导入 "Import"外部表格数据到项目中,表格是.csv 格 式,当设置好后,点击 "OK"完成设置。

Settings	
Name	Value
Basic Property	
Name	Zone
ParticleID	3
ZoneName	gear02
Parameter	
State of Matter	Solid
Material	OII
Slip Coefficient	1
Motion	Stationary
Flow Parent	Rotation
Stationary	TransAndRota
Center Point	TableFile
х	-0.032936
Y	-0.009956
Z	0.138095

图 41 运动方式设置对话框

Settings	
Name	Value
Parameter	
State of Matter	Solid
Material	Oil
Slip Coefficient	1
Motion	Translation
- Translation	
Translation Direction	x
Pattern	Position
Velocity	Row:2,Col:4
⊡ Center Point	
x	-0.032936
Y	-0.009956
Z	0.138095

图 42 平移设置面板

	t	reference x	reference y	reference z
ų	0	0	0	0
2	0.1	5	0	0
3	10	5	0	0

图 43 平移速度设置表格

旋转:选择"Zone"节点下面的一个部件→"Settings"面板→"Motion",选择"Rotation"。 需要设置旋转轴"Normal X"、"Normal Y"和"Normal Z",此时,在图形显示区中, 选中部件会高亮显示,部件坐标坐落在几何中心位置,黄色高亮的箭头是旋转轴,旋转 运动遵循右手法则,如图 44;旋转点的设置是 Center Point 下的"X"、"Y"和"Z", 默认是部件的几何中心坐标值。"Pattern"方式提供"Angle"、"Rotation Speed (rpm)" 和"Angular Velocity (rad/s)"三种旋转指定方式,默认是"Rotation Speed (rpm)"方式。 在"Rotation"最右侧点击"□"图标,打开旋转定义表格如图 45。表格第一列是时间, 单位秒,第二列是旋转速度大小,单位由"Pattern"确定。表格第一行输入的数值必须 是 0,如果行数不够,可以右键点击行号选择"Insert Column At Below"增加新的一行, 如果需要删除某行,右键对应的行号选择"Delete Row";支持定义好的表格数据导出 "Export"保存,或者导入"Import"外部表格数据到项目中,表格是.csv格式,当设置好后,点击"OK"完成设置。

Control Panel		
Analysis	Post	Pre-Window
gear01		
🗐 liquid		
🗐 gear02		
gear03		
Settings		
Name	Value	
Basic Property		
Name	Zone	
ParticleID	3	
ZoneName	gear02	
🖂 Parameter		
State of Matter	Solid	
Material	Oil	
Slip Coefficient	1	
Motion	Rotation	
Flow Parent		
🖂 Rotate		
Normal X	0	
Normal Y	1	
Normal Z	0	
Pattern	Rotation Speed(rpm)	
Rotation	Row:2,Col:2	
🖂 Center Point		
x	-0.032936	Console
Y	-0.009956	MainWindow.setGeometryShapeValue(14, 'Upacity', 'Double', 'U') MainWindow.setGeometryShapeValue(14, 'Opacity', 'Double', '0')
z	0.138095	MainWindow.setGeometry/ShapeValue(15, "Opacity", "Double", "0") MainWindow.setGeometryShapeValue(15, "Opacity", "Double", "0")

图 44 旋转设置面板

	t	rotate
Ļ	0	0
2	0.1	1500
3	10	1500
5	10	1300



平移旋转组合:选择"Zone"节点下面的一个部件→"Settings"面板→"Motion", 选择"TransAndRota"。需要设置旋转点的设置是 Center Point 下的"X"、"Y"和"Z", 默认是部件的几何中心坐标值,如图 46,旋转点的设置是 Center Point 下的"X"、"Y" 和"Z",默认是部件的几何中心坐标值。在"Motion"最右侧点击"□"图标,打开平 移旋转组合定义表格如图 47。表格第一列是时间,单位秒,第二到第四列,分别是 xyz 方向的速度大小,第五到第七列,分别是 xyz 方向的旋转速度大小,单位是角度。表格 第一行输入的数值必须是 0,如果行数不够,可以右键点击行号选择"Insert Column At Below"增加新的一行,如果需要删除某行,右键对应的行号选择"Delete Row";支持定义好的表格数据导出"Export"保存,或者导入"Import"外部表格数据到项目中,表格是.csv 格式,当设置好后,点击"OK"完成设置。

Settings	
Name	Value
Basic Property	
Name	Zone
ParticleID	5
ZoneName	shell
- Parameter	
State of Matter	Solid
Material	Oil
Slip Coefficient	1
Motion	TransAndRota
I TransAndRota	
Motion	Row:2,Col:7
E Center Point	
х	-0.09074
Υ	0.013122
Z	0.058338

图 46 平移旋转组合设置面板

t	reference x	reference y	reference z	rotate x	rotate y	rotate z
. 0	0	0	0	0	0	0
2 0.5	-2	0	0	1500	0	0
3 10	-2	0	0	1500	0	0

图 47 平移旋转组合速度设置表格

导入外部复杂运动路径文件:选择"Zone"节点下面的一个部件→"Settings"面 板→"Motion",选择"TableFile"。在"Motion"最右侧点击"□"图标,打开导入 外部复杂运动路径文件表格如图 48,点击"Import"按钮导入外部的.csv 格式表格。表格第一列是时间,单位秒,第二到第四列,分别是 xyz 方向的坐标点大小,第五到第七 列,分别是 xyz 方向的旋转速度大小,单位是角度。表格第一行输入的数值必须是 0,

如果行数不够,可以右键点击行号选择"Insert Column At Below"增加新的一行,如果 需要删除某行,右键对应的行号选择"Delete Row";支持定义好的表格数据导出"Export" 保存,或者导入"Import"外部表格数据到项目中,表格是.csv 格式,当设置好后,点击"OK"完成设置。

Settings	
Name	Value
Basic Property	
Name	Zone
ParticleID	4
ZoneName	gear03
Parameter	
State of Matter	Solid
Material	Oil
Slip Coefficient	1
Motion	TableFile
⊡ TableFile	
Motion	Row:2,Col:7
E Center Point	
х	-0.187931
Υ	0.001664
Z	0.078672

图 48 导入外部复杂运动路径文件设置面板

velocity						
t	reference x	reference y	reference z	rotate x	rotate y	rotate z
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

图 49 导入外部复杂运动路径文件设置表格

6.4. 自由运动 6DOF

■ 功能描述

对于自由运动(被动运动)的物体,即液体影响着固体的运动轨迹,软件提供了自

由运动 6DOF 模型进行仿真计算。

■ 操作步骤

选择"Zone"节点下面的一个部件→"Settings"面板→"Motion",选择"Free Motion", 如图 50 所示。需要输入的参数有"Mass"质量、"Moment of Inertia"部件惯性矩、"Initial Center of Gravity"部件初始重心位置、"Initial Translation Velocity"部件初始平动速度、 "Initial Rotation Velocity"部件初始转动角速度、"Translation Freedom"部件激活哪些 平动自由度、"Rotation Freedom"部件激活哪些转动自由度。

Settings		
Name	Value	
ZoneName	gear03	
∃ Parameter		
State of Matter	Solid	
Material	Oil	
Slip Coefficient	1	
Motion	Free Motion	
Free Motion		
Mass	1	
Moment of Inertia		
X Component	1	
Y Component	0	
Z Component	0	
Initial Center of Gravity		
X Component	1	
Y Component	0	
Z Component	0	
Initial Translation Velocity		
X Component	1	
Y Component	0	
Z Component	0	
Initial Rotation Velocity		
X Component	1	
Y Component	0	
Z Component	0	
Translation Freedom		
X Component		
Y Component		
Z Component		
Rotation Freedom		
RX Component		
RY Component		
RZ Component		
Center Point		
x	-0.187931	
Y	0.001664	
Z	0.078672	

图 50 自由运动设置面板

6.5. 部件从属运动

■ 功能描述

设置部件的从属关系,子零部件继承父零部件的运动属性,有以下的支持和限制。 支持:

1)、旋转跟随旋转运动。

2)、旋转跟随平移运动。

3)、旋转跟随导入外部复杂运动路径文件 TableFile 运动。

4) 、平移跟随平移运动。

限制:

1)、导入外部复杂运动路径文件 TableFile 运动不能跟随任何其他运动。

2)、系统里面所有旋转物体相互跟随的时候,转轴需要平行。

■ 操作步骤

选择"Zone"节点下面的一个子零部件→"Settings"面板→"Flow Parent"勾选。

Control Panel	
Analysis	Post
▼ Case_1	
🔹 👣 Zone	
🔻 🗾 carbody	
🗂 mirror	
🗾 exhaus	t
 Wheels 	front
Settings	1000
Name	Value
ZoneName	mirror
Parameter	
State of Matter	Solid
Material	Water
Slip Coefficient	1
Motion	Rotation
Flow Parent	V
🗉 Rotate	
Normal X	0
Normal Y	0

图 51 部件从属运动设置对话框

6.6. 边界条件

■ 功能描述

提供速度入口边界条件,用以仿真有液体入口的工况。

■ 操作步骤

Control Panel 面板→"Case"→"Boundary Condition",右键选择"Create Boundary Condition",弹出创建边界条件对话框,图 52 所示。在"Set"选项中选择在"Geometry" 节点创建的入口几何名称,"Type"选项中选择"Inlet",然后点击"OK"按钮。在 Control Panel 面板的"Boundary Condition"下出现"边界类型@边界几何名称"格式命 名的边界,图 52 所示。如果需要创建多个入口边界条件,重复上述的操作。



图 52 创建边界条件对话框

Control Panel	
Analysis	Post
🔻 🞁 Zone	
 Carbody 	
🗂 mirror	
🗾 exhaust	
 multiple wheels_fr 	ont
🗐 axle	front
 multiple wheels_relation 	ear
🗐 axle	rear
 Boundary Condition 	n
Inlet @ inlet_8	
Domain	
Gravity	
Physical Model	
Solver Setting	
Run	

图 52 "Boundary Condition"节点下显示创建的边界

在入口边界条件的 Settings 属性面板中图 53 所示,需要设置的参数有: Material 材料、Flux 流量以及 Injection Normal 入口流入的法向。其中,Flux 流量的单位是 m/s,在 "Flux"最右侧点击"日"图标,打开流量输入设置对话框表格如图 54,表格第一列输入时间,第二列输入是流速大小。表格第一行时间输入的数值必须是 0,流速根据项目 实际大小设置。如果行数不够,可以右键点击行号选择"Insert Column At Below"增加 新的一行,如果需要删除某行,右键对应的行号选择"Delete Row";支持定义好的表 格数据导出"Export"保存,或者导入"Import"外部表格数据到项目中,表格是.csv 格式,当设置好后,点击"OK"完成设置。

Name	Value	
Basic Property		
GeoComponentID	2	
Boundary condition type	Inlet	
- Parameter		
Material Water		
Flux	Row:2,Col:2	
Injection Normal		
Normal X	0	
Normal Y	0	
Normal Z	1	

图 53 入口边界条件的 Settings 属性面板设置对话框

	t	flux	
1	0	2	
2	10	2	
3	20	4	

图 54 流量设置对话框

6.7. 计算域

■ 功能描述

计算的范围,位于计算域内的粒子会追踪计算,当粒子超出计算域外则不追踪计算。

■ 操作步骤

Control Panel 面板→"Case"→"Domain",在 Settings 面板设置相关属性值。如 图 55 所示,需要设置 X、Y、Z 轴在正负方向的扩展值,单位米。在图形显示区域以黑 色矩形框显示计算域的大小如图 56 所示。

Name	Value
Basic Property	
Name	Domain
Parameter	
Enable	✓
X- Offset	0
X+ Offset	0
Y- Offset	0
Y+ Offset	0
Z- Offset	0
Z+ Offset	0

图 55 计算域 Settings 面板对话框



图 56 以黑色矩形框显示计算域的大小(X、Y、Z 轴方向扩展1米)

6.8. 重力

■ 功能描述

设置重力的方向和大小。

■ 操作步骤

Control Panel 面板→ "Case" → "Gravity",在 Settings 面板设置相关属性值。如
图 57 所示,需要设置 Gravity Value 重力大小以及 Gravity Direction 重力方向。

Name	Value
Basic Property	
Name	Gravity
Parameter	
Gravity Value	9.8
Gravity Direction	
Х	0
Υ	0
Z	-1

图 57 重力设置对话框

6.9. 物理模型

■ 功能描述

将相关的物理模型添加到求解计算中。

■ 操作步骤

Control Panel 面板→"Case"→"Physical Model",在 Settings 面板选择物理模型。 如图 58 所示,勾选需要考虑的物理模型。在 SimArk Particles V1.0 版本软件中,可以考虑的物理模型是表面张力模型。

Basic Property Name Physical Model Parameter	Physical Model
Name Physical Model	Physical Model
Parameter	
Surface Tension	

图 58 物理模型 Settings 面板对话框

6.10. 求解设置

■ 功能描述

设置求解的相关参数,包括求解基本参数和求解高级参数。

求解基本参数:

- (1) Simulation Time: 仿真时间。如果工况存在运动部件或入口边界,则模拟时间 必须小于运动定义时间或流量定义时间的最小值,否则会报错。
- (2) Save File by Step: 保存中间结果文件的方式,提供按时间间隔 Time 或者时间 迭代步数 Step 两种方式,默认是 Time。
- (3) Save Time Binary: 当 Save File by Step 选择 Time 时出现, 保存中间结果文件的时间间隔。
- (4) Save Step Binary: 当 Save File by Step 选择 Step 时出现,保存中间结果文件的时间迭代步数间隔。
- (5) Save Step Monitor: 求解过程中监控变量的输出频率。

求解高级参数:

(1) CFL number: Courant-Friedrichs-Lewy 条件稳定数。大于 0 的浮点数, 推荐范

围是 0.5-1.0, 默认值是 1.0。在粒子法中, CFL 代表单位时间内流体粒子位移 与光滑长度的比值。CFL 是 CFD 中通用的条件稳定数, CFL 越大(小), 时 间步长越大(小), 计算速度越快(慢), 但是计算越不稳定(稳定)。

- (2) Slip Coefficient: 滑移系数, 默认值是 1。Slip Coefficient = 0 为 free-slip 自由滑
 移条件; Slip Coefficient = 1: non-slip 无滑移条件。
- (3) Coeff of Smoothing Length: 光滑长度系数。大于 0 的浮点数,推荐范围是 1.25-1.5,默认值是 1.25。光滑长度系数会影响一个目标粒子的周围邻居粒子个 数。光滑长度系数越大(小),周围邻居粒子越多(少),计算量越大(小), 计算精度越高(低)。
- (4) Coeff of Maximum Particle Number:最大粒子系数。大于 1 的浮点数,默认值 是 1。如果没有流入边界,那么模拟过程中流体粒子不增不减,取值为 1 即可; 如果存在流入边界,那么模拟过程中流体粒子会不断增加,需要预留一定的内 存空间给新的流体粒子,具体取值根据问题来确定。程序内部的具体公式为: n_{max}=Φn_{total},其中 total 代表初始粒子总数,Φ为最大粒子系数。
- (5) Physical Viscosity: 是否采用物理粘性,默认不采用。对于以惯性力为主导的问题,流体粘性影响不大,可采用人工粘性以提高计算稳定性(需要设置材料属性的人工粘性系数);对于粘性效应明显的问题,建议开启本参数(需要设置材料的物理粘性系数)。
- (6) Tecplot Output: 是否将结果文件输出为 plt 文件, 默认否。
- (7) Paraview Output: 是否将结果文件输出为 vtk 文件, 默认是。
- (8) Particle Shifting: 粒子位移修正(Particle Shifting Technique, PST),默认不起用,是近年来 SPH 界新发展的一种技术,可使流场粒子分布分为均匀。但是将 PST 用到自由液面问题时可能存在计算不稳定现象。对于一般工程问题,不需要采用 PST。
- (9) Tensile Instability Control: 张力不稳定性控制(Particle Shifting Technique, PST), 默认不起用,是近年来 SPH 界新发展的一种技术,可抑制流场的非物理性空 泡。对于一般工程问题,不需要采用 TIC。
- (10) Hydrophobic Wall: 是否采用完全疏水边界,默认否。如果出现流体粒子附着在固体壁面上滑行的现象,建议开启本参数。

■ 操作步骤

Control Panel 面板→ "Case" → "Solver Setting", 在 Settings 面板设置相关求解参数如图 59 所示。

Settings	
Name	Value
Basic Property	
Name	Solver Setting
Parameter	
Simulation Time	5
Save File by Step	Time
Save Time Binary	0.02
Save Step Monitor	1
Advanced	
CFL number	1
Slip Coefficient	1
Coeff of Smoothing Length	1.25
Coeff of Maximum Particle Number	1
Physical Viscosity	
Tecplot Output	
Paraview Output	V
Particle Shifting	
Tensile Instability Control	
Hydrophobic Wall	

图 59 求解设置 Settings 面板对话框

6.11. 提交计算

■ 功能描述

设置提交计算的相关参数,包括设置 CPU 还是 GPU 求解、是否是续算 Restart 以及确认提交到求解器求解。

■ 操作步骤

Control Panel 面板→ "Case" → "Run",在 Settings 面板设置相关提交计算参数如

图 60 所示。默认是采用 CPU 并行计算,需要设置 CPU 的核数。如果需要采用 GPU 加速计算,勾选 GPU 后的方框。如果需要续算,先勾选"Restart",然后设置"Save Step Reboot"续算开始计算的结果文件。

Name	Val	ue
Basic Property		
Name	Run	
Parameter		
GPU		
CPU	8	2
Restart		
Save Step Reboot	0	-

图 60 提交计算 Settings 面板对话框

点击工具栏的"■" Solver 求解器,或者点击 Control Panel 面板→"Case"→右键 "Case_1(案例名称)",选择"Solve Case"如图 61 所示。然后弹出的提交求解对话 框,在 Project 下拉框中选择需要计算的 case,点击"Solve"按钮。

Control Panel		
Analysis		Post
 Particles Generation Particle Particle Carbody Materials Water Case 	(1)	
Case_1	Delete Case Solve Case Rename Case Import Template Open Directory heels_front	

图 61 Solve Case 对话框

Bolve Pr	oject		;
Project:	Case_1		•
Solver:	SPH		•
		Solve	Cancel

图 62 提交计算对话框

7. 数据后处理

SimArk Particles 软件对被激活的.vtk 文件进行数据后处理操作,具体功能包括:

- (1) 云图渲染:将物理量分布显示在粒子上。
- (2) 切面: 在计算域内指定切平面上显示物理量分布。
- (3) 动画:将中间结果文件按指定的物理量分布云图进行提取生成动画并导出动画。
- (4) Mapping:将进壁面的液体粒子的物理量映射到附近的固体壁面上显示。
- (5) 2D 图表:二元数据的曲线图。

7.1. 后处理界面

■ 功能描述

对粒子结果文件进行可视化显示和数据处理的软件界面。

■ 操作步骤

点击工具栏的"3D Plot",然后点击"Control Panel"的"Post",进入后处理界面,图 63 所示。当导入计算结果文件后,工具栏的快捷图标功能激活,工具栏提供后处理功能有:

- (1) saveImage 保存为图片:将当前后处理操作显示的云图保存为图片,可以保存 为.png、.jpg、.bmp、.eps 格式,如图 64 所示。
- (2) saveAnimation 保存为动画:将当前后处理操作显示的云图保存为动画,保存为.avi 格式,如图 65 所示。需要设置的参数有帧数 Frame Rate (fps)、帧间隔 Frame Step、时间步范围 Timestep Range、像素 Resolution (Pixels),提供是否保存图片功能,默认不保存,只保存为动画。
- (3) clip 切面:在计算域内指定切平面上显示物理量分布。
- (4) calculator 计算器: 对物理变量进行数学运算。
- (5) threshold 变量提取:提取结果文件中特定的物理变量进行显示。
- (6) ScalarBar 颜色条:是否在图形显示区域显示颜色条,默认显示。
- (7) EditColor 颜色条编辑:编辑颜色条显示的字体大小、标签数量、最大最小值范 围等。

(8) 物理量:选择结果文件中的物理量进行云图渲染。

File 🖕	Home 3D Render														- 🗆 ×
Å	Ē.	0				0	Q		i.	SolidColor		X			
savelmag	e saveAnimation	contour	clip	calculator	threshol	d ScalarBar	editColor	CgnsAnITimes	Export	D Points					
Control	Analysis			Post				Pre-Wi	ndow					3D Graph	
61	ouildin														
 ⊘ Apr → Prop → Disp ✓ View ✓ 0 ⊂ C ⊂ R Backg gin 	oy erties lay , emark parallel pr emark gje color	lity				Os	Í + Í Ľ ► № I openPost3	[*] • [¥] • [¥] 1 M timeStep(s DD)	;); 0		0 +	File Inter Proc	ral:1 🜩		SimArk Particles
5															Canvas 4.31031mm * 2mm

图 63 软件后处理界面

5	Save Image		
	width: 1266	height: 747	
	file name		
100	Save POV		
	filo nomo		1

图 64 保存为图片对话框

	Rate (fps)		15.00		\$
Numbe	r of Frames	s (12		÷
Frame	Step		1		\$
Times	tep Range		0	\$ 11	¢
Resol	ution (Pixe	els)	1266	747	
	Save Image format	png		*	
	filenath				
	11100000				
	Save POV				

图 65 保存为动画对话框

在图形显示区的下方,提供了一组快捷操作工具按钮,包括视图便捷显示和动画进 度控制条:

- . 将当前视图调整为适应整个可视化窗口。
- L. 将当前视图切换为 ZY 视图。
- **」**:将当前视图切换为 YZ 视图。
- 📫 : 将当前视图切换为 XZ 视图。
- 🕌: 将当前视图切换为 zx 视图。
- 将当前视图切换为 YX 视图。
- 🗾: 将当前视图切换为 XY 视图。
- ▶ . 将当前时刻显示的结果文件切换到第一帧结果文件显示。
- ◀: 切换到上一帧结果文件显示。
- ▶. 动画播放。
- ▶: 切换到下一帧结果文件显示。
- ▶: 切换到最后一帧结果文件显示。

7.2. 粒子结果文件加载

■ 功能描述

由于 SPH 粒子法仿真是瞬态仿真,所以会有多个中间结果文件,需要同时将所有结果文件加载到软件中,方能进行完整的数据后处理。在 SimArk Particles 软件生成的粒子结果文件中,有一个.series 格式文件如图 66 所示,只要加载这个文件到软件中,那么所有结果文件自动加载到软件。

■ 操作步骤

右键 Control Panel 面板选择 "Post"页面, "buildIn"右键选择 "Create result set" 创建 "result_1", 然后在 "result_1"右键选择 "Open"如图 67 所示, 弹出文件夹导航 窗口,导航到粒子结果文件所在目录选择.series 格式文件加载,最后,点击 "Apply" 按钮如图 68 所示,软件自动读取所有结果文件,如图 69 所示。

名称	修改日期	类型	大小
Collection.vtk.series	2022/11/7 21:58	SERIES 文件	1 KB
particle_00000000.vtk	2022/11/7 21:57	VTK 文件	81, <mark>4</mark> 80 KB
particle_000000001.vtk	2022/11/7 21:57	VTK 文件	81, <mark>4</mark> 80 KB
particle_00000007.vtk	2022/11/7 21:57	VTK 文件	81, <mark>4</mark> 80 KB
particle_000000013.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB
particle_000000019.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB
particle_00000025.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB
particle_00000031.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB
particle_00000037.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB
particle_00000043.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB
particle_000000049.vtk	2022/11/7 21:58	VTK 文件	81,480 KB

图 66 SimArk Particles 软件结果文件示意图

buildIn result_1 Open Delete result set Create Clip	buildIn result_1 Open Delete result set Create Clip	buildIn result_1 Open Delete result set Create Clip	buildIn result_1	Open	
result_1 Open Delete result set Create Clip	result_1 Open Delete result set Create Clip	result_1 Delete result set Create Clip	result_1	Open	
result_1 Open Delete result set Create Clip	result_1 Open Delete result set Create Clip	result_1 Delete result set Create Clip	result_1	Open	
Delete result set Create Clip	Delete result set Create Clip	Delete result set Create Clip		Open	
Create Clip	Delete result set Create Clip	Create Clip		and the second second second	
Create Clip	Create Clip	<u>Create Clip</u>		Delete result set	
				Create Clip	

图 67 打开结果文件对话框

Analysis	Post
🛚 📑 buildIn	
▼ result_1	
🗹 🗐 result_00000000*	
Properties(result 00000000.vtk)	
Display	
 View 	
V Orientation Visibility	
Camera parallel projection	
Remark	
Background	
single color	

图 68 加载结果文件对话框

File _ Ho	me 3D Render															- 🗆 ×
*			¢			0		2	a,	Bunber_Densi ty		x				
savelmage	saveAnimation	contour	clip	calculator	threshold	ScalarBar	editColor	CgnsAniTimes	Export	Gaussian Point						
Control Panel								Pre-Win	lov					30 Graph		
	Analysis			Post												
🔻 [buil	dln					0.301	925s								Sim	Ark
▼ resu	ilt_1														Parti	icles
*	particle_0	*00000000														
	🔽 🏩 Thres	holdFilter1														
	🗹 🏽 Thres	holdFilter2														
	🔽 🔅 Thres	holdFilter3														
								******	No. of Concession, Name							
					1	Number	Density		-	Survey of Contraction of Contraction	Salar Market State	No. Competence		1	alex	
						80.0					and the second		un. Diferences			
						60.0							ALCO CLASS			
						40.0										and the second
(Apply						20.0	1 ²									
 Properti 	es(particle_0000000	000.vtk <thre< td=""><td>esholdFi</td><td>lter3>)</td><td></td><td>0.00</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></thre<>	esholdFi	lter3>)		0.00										
Display																
★ View					[X 1 y y	1 ±1 t	x 1 x x x								
	und on Windkilding															
Capacit	nerolal projection							tineStep(s);	0.30	1925	32 🗣 of 33	File Interval:	1 🌻			
Report					Con	nole						Process				
Backgrou	ind				parti	cle_00000000*.v	k")									
lingle	color				Post	Process.script_Filt Process.script_Filt	erThreshold(-1 erThreshold(-1	*Post3D*,1)			- 1					
single	COIOI				Post	Process.script_Hit Process.script_ap	erThreshold(-1 plyClicked(-1,*1	,"Post3D",1) Post3D")								
					Posti	Process.script_op icle_000000000*.v	enFile(-1,*Post: k*)	ID", "D:/test/simark10	18/Working	Dir/car1201/Output/	particle/					
					Post	Process.script_Filt Process.script_Filt	erThreshold(-1 erThreshold(-1	*Post3D*,5) *Post3D*,5)								
					Post	Process.script_Filt	erThreshold(-1	*Post3D*,5)								
															Canvas 28m	m * 2mm

图 69 加载结果文件后的软件界面

SimArk

7.3. 云图渲染

■ 功能描述

将物理量分布显示在粒子上。

■ 操作步骤

0.615501s

在工具栏中,确认采用"Gaussian Point"高斯点显示粒子文件。然后在物理变量下 拉框中选择需要的物理量如图 71 所示进行云图渲染。图 72、图 73 和图 74 分别采用 物理变量 Number_Density、Velocity 和 Wet_Time 进行云图渲染结果图。

X	
	x

图 70 选择高斯点显示粒子



图 71 物理变量选择对话框



图 72 采用 Number_Density 云图渲染





7.4. 切面

■ 功能描述

在计算域内指定切平面上显示物理量分布。

■ 操作步骤

在工具栏中,点击"^{••}" clip 图标,在属性对话框中设置平面的坐标点和法向,或 者点击预设置好的 X、Y、Z 轴法向按钮"X Normal"、"Y Normal"或者"Z Normal", 点击"Apply"按钮确认,如图 75 所示。切面框在图形显示区如图 76 所示。可通过鼠 标对切面框进行快速移动,鼠标放在切面框上方,按下鼠标中键不放松,可以平移切面 框;鼠标放在切面框方向的箭头线上,按下鼠标左键,可以对切面框进行上下和左右倾

斜操作。

A	nalys <mark>i</mark> s		Post	
📑 buildIr	1			
▼ result	1			
▼	resul	t 000000000*		
		- Clip1		
S Apply				
Properties(result_0000	00000.vtk <clip1>)</clip1>		
-				
plane	lana			
origin	-37	0.0229	0.485	
ongin	5.1	0.0223	0.703	
normal	1	0	0	
XN	ormal	Y Normal	Z Normal	
Camera	a Normal			
✔ Inside o	at			
Display				
Display				
View				
	a Visibility			
✔ Orientation				
✔ Orientation Camera par	allel project	ion		
✔ Orientation Camera par Remark	allel project	ion		
✓ Orientation Camera par Remark Background	allel project	ion		
 Orientation Camera para Remark Background single col 	allel project 1 Or	ion		

图 75 clip 功能属性设置对话框



图 76 clip 切面图框显示

"show plane"勾选框是在图形显示区中显示平面,如图 77 和图 78, "Inside out" 选框是在图形显示区中反向显示粒子空间分布,如图 79 所示。

0.615501s

SimArk Particles





0.615501s

SimArk Particles



7.5. 动画

■ 功能描述

将中间结果文件按指定的物理量分布云图进行提取生成动画并导出动画。

■ 操作步骤

在工具栏中,点击"[©]" saveAnimation 图标,将当前后处理操作显示的云图保存为动画,保存为.avi 格式,如图 65 所示。需要设置的参数有帧数 Frame Rate (fps)、

帧间隔 Frame Step、时间步范围 Timestep Range、像素 Resolution (Pixels),提供是否 保存图片功能,默认不保存,只保存为动画。生成并保存动画后,可以用第三方的视频 播放器进行动画播放。

7.6. Mapping

■ 功能描述

将中间结果文件按指定的物理量分布云图进行提取生成动画并导出动画。

■ 操作步骤

在 Control Panel 面板→Post 页面→ "buildIn" → "result_1" → "result_0000000000*" 下面的部件选项, 对于需要 Mapping 的固体部件其名称前面保留勾选, 其余部件名称前 面取消勾选, 然后在显示物理量中选择需要 Mapping 的物理量, 渲染效果如图 80 所示。 0.693504s SimArk Particles



图 80 Mapping 渲染示意图

7.7. 2D 图表

■ 功能描述

二元数据的曲线图。数据需要保存为.dat 格式文件,文件第一行是每列的标题名称, 每列之间用一个空格分开。

■ 操作步骤

点击菜单栏 Home, 点击工具栏的" **1** " 2D Graph 图标, 打开 2D Graph 图形显示 区域。在 Control Panel 面板→Post 页面→Curve_project, 右键选择"add file", 弹出"open"

导航窗口,找到.dat 格式数据的位置,双击加载。数据自动加载并在软件界面左下角面 板进行显示,勾选每列标题名称前面的勾选框,在图形显示区域则显示曲线图,如图 81 所示。



图 81 2D 图表对话框

双击图形显示区域图标的横坐标标题 X1 或者纵坐标标题 Y1,可以对标题进行编辑,如图 82 所示。可以设置坐标标题 axis name、字体 font、范围 Range 和坐标数据源 xAxis dataSource,调整后如图 83 所示。

axis name Time [s]	
font	
type	Arail
color	select color
size	8
Range	
min 0	max 364
	Rescale
xAxis dataSource	
	index -
dataSource	
dataSource dataFile	

图 82 坐标标题设置对话框



图 83 调整好坐标标题设置的曲线图
8. 求解器精度验证

SimArk Particles 软件采用的 SPH 模型为 δ⁺-SPH 模型(弱可压假设)。质量方程 中加入密度耗散项以缓和压力振荡问题,动量方程加入人工粘性项以提高数值稳定性。 压力和密度采用状态方程进行线性解耦,从而可将控制方程组进行显式离散。为了保证 保证数值模拟的精确性和稳定性,离散后的控制方程组采用四阶龙格库塔法(RK4)进 行时间积分。

SimArk Particles 软件采用三种方法进行求解器精度验证:与实验对比验证、与商业 软件对比验证以及与网格法对比验证。

8.1. 与实验对比验证

SimArk Particles 软件计算结果和实验现象、实验数据对比,从而验证求解器精度。

8.1.1. 3D 溃坝

三维溃坝的物理现象是自由液面和刚体之间的剧烈相互作用,是一个用于验证数值 计算的经典算例。

三维溃坝的实验现象和实验数据来源于文献《Kleefsman, K., Fekken, G., Veldman, A., Iwanowski, B., Buchner, B., 2005. A volumeof-flfluid based simulation method for wave impact problems. J. Comput. Phys. 206 (1), 363 - 393.》。



几何尺寸和压力传感器的位置如图 84 所示。

图 84 几何尺寸和压力传感器的位置

对比仿真结果和实验现象如图 85 和图 86 所示,在水自由液面的形状和到达时间



图 85 t=0.4s 时刻仿真结果和实验现象对比(左图为仿真结果,右图为实验)





图 86 t=0.56s 时刻仿真结果和实验现象对比(左图为仿真结果,右图为实验)

对比仿真监控数据和压力传感器实验数据如图 87 所示,在曲线的趋势和数值大小 上取得良好的一致。



图 87 压力-时间取消仿真结果和实验数据对比 P1(a)、P3(b)、P5(c)、P7(d)

8.1.2. 圆柱体自由入水

圆柱体自由入水实验采用高速摄像机实验测量了斜角圆柱体的进水情况。

圆柱入水速度 1.92m/s, 倾斜角 35°。圆柱长度 0.15m, 直径 0.032m, 质量 0.145kg, 如图 88 所示。



图 88 圆柱入水几何示意图

对比仿真结果和实验现象如图 89 所示,圆柱体的姿势、位置和液态水自由液面吻 合良好。





不同时刻下 t=0.035s、t=0.068s 和 t=0.093s 的速度分布云图如图 90 所示。当圆柱体穿透水面时,圆柱体会向水平方向旋转,并向前移动。这是由于圆柱体最初的斜角引起 了不对称的水动力造成的。此外,水的飞溅也再现得很好,圆柱体右侧撞击水面时,先 溅起射流,圆柱体左侧进入水面后溅起大量水花。



图 90 t=0.035s、t=0.068s 和 t=0.093s 的速度分布云图

对比圆柱体重心 X 轴和 Y 轴方向的变化, 仿真结果和实验数据如图 91 所示, 数据 吻合良好。





对比圆柱体重心旋转角度的变化,仿真结果和实验数据如图 92 所示,数据吻合良好,表明仿真圆柱体的自由运动和实验基本一致。



图 92 物体重心旋转角度对比

8.1.3. 波浪拍打平板

畸形波又叫"怪波",英文名为"Freak wave"。之所以称为"畸形波"是因为它

的波高超乎寻常地大,而且出现很突然,几乎无规律可言。由于其极大的波高,对海上 建筑物容易产生巨大危害。畸形波是一种单峰波,与孤立波有点相似。但它的波峰很尖, 波高很大,这与孤立波这种推进波又有很大区别。畸形波持续时间短,很快消失,也不 同于驻波,畸形波的波形随时间变化;与地震等因素无必然联系,故又不同于海啸。

畸形波拍打固定平板的几何示意图以及在平板上布置了4个压力传感器如图 93 所示。畸形波拍打固定平板的现象包括波浪正面冲击平板,然后波浪吸附在平板底面前行。



图 93 畸形波拍打固定平板的几何示意图

采用本软件求解器粒子法计算波浪正面冲击平板的仿真云图和实验现象对比如图 94 所示,实现了自由液面较高精度的复现。

对于吸附现象的仿真云图和实验现象对比如图 95 所示,实现了自由液面较高精度的复现。

74



图 94 冲击现象的仿真和实验对比,上方是实验,下方是仿真结果



图 95 吸附现象的仿真和实验对比,上方是实验,下方是仿真结果 对于四个监控点的仿真数据和实验数据对比如下所示,两种呈现良好的一致性。



8.2. 与商业软件对比验证

SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的粒子法商业软件的仿真计算结果对比,从而验证求解器精度。

8.2.1. 整车涉水

车辆的防水性能,包括涉水、淋雨、洗车等工况下的防水性能,是整车研发中的关键性能指标之一,也是消费者最易感知的性能之一。整车涉水是防水性能设计中非常重要的工况。在此工况中,水会进入车身内部,从而堵塞通风口或影响电力系统的运行等,特别是对于纯电动车和混合动力车,其高压动力电池及电气附件容易损坏和短路,引发安全事故。

因此,如果在设计之初,通过数值模拟,把水流侵入路径与侵入量进行较准确的评估,就能帮助车企在该重要场景做到产品正向设计与最优化设计。

传统的基于有限体积法的 CFD 仿真中主要使用 VOF 方法。几何模型清理工作繁琐、网格划分工作量大且网格质量要求高、VOF 方法难定义车辆的复杂运动过程、仿 真收敛性差等诸多因素,都极大地限制了仿真精度与工程实用性。

对于液体的飞溅、撕裂、自由液面形态严重变形的现象,可以采用高精度粒子法求

解器进行模拟。粒子法是一种无网格方法,将连续的流体或固体用相互作用的质点组来 描述,包含质量、压力、速度等,求解动力学 Navier-Stokes 方程,跟踪每个质点的运 动轨迹,从而求得整个流场的分布。

对比验证的整车涉水的几何如图 97 所示,汽车的运动路径通过导入外部.csv 格式数据文件确定,路面涉水段的水位高度为 0.2m。



图 97 整车涉水的几何

时间 t=1.055s 时刻的速度分布云图如图 98 所示,在速度大小以及自由液面的空间 分布上,SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的粒子法商业软件的仿真计算 结果几乎一致。

t = 1.05525972 s



图 98 t=1.055s 时刻的速度分布云图,上图为 SimArk Particles 软件结果,下图为某国外成熟

的粒子法商业软件结果

时间 t=1.265s 时刻的速度分布云图如图 99 所示,在速度大小以及自由液面的空间 分布上, SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的粒子法商业软件的仿真计算 结果几乎一致。



图 99 t=1.265s 时刻的速度分布云图,上图为 SimArk Particles 软件结果,下图为某国外成熟的粒子法商业软件结果

从图 98 和图 99 的仿真结果对比看,SimArk Particles 软件仿真得到的自由液面撕裂、破碎、液膜现象更加符合真实的物理现象,比某国外成熟的粒子法商业软件仿真结果优秀。可见,在求解精度方面,SimArk Particles 软件媲美甚至一定程度上优秀于某国外成熟的粒子法商业软件。

8.2.2. 齿轮箱搅油润滑

随着纯电动车动力性能的不断提升,减速器的最高输入转速和最大输入转矩也不断 提高,这为减速器的润滑性能带来巨大挑战。如果润滑不良,运动零件的传递效率将受 到影响,润滑严重不足者将导致齿轮胶合、轴承烧蚀和油封老化等失效问题。基于传统 的有限体积 CFD 仿真技术,对减速器复杂运动进行仿真时,网格畸变和扭曲十分常见, 计算精度受到严重影响。

在车辆行业中,快速而准确地预测在复杂结构内伴有复杂机械运动的液体流动,是 一项巨大的挑战,但是对于车辆内部水管理的设计优化和减速器润滑系统设计的合理性 验证,具有非常重要的指导意义。

对比验证的齿轮箱搅油润滑的几何如图 97 所示,齿轮箱内有两个齿轮,油位高度为0.065m。其中,大齿轮的转速为-282.2727 [rpm],小齿轮的转速为 981.818 [rpm]。



图 100 齿轮箱搅油润滑的几何

时间 t=0.008s 时刻的速度分布云图如图 101 所示,在速度大小以及自由液面的空间 分布上, SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的粒子法商业软件的仿真计算 结果几乎一致。



图 101 t=0.008s 时刻的速度分布云图, 左图为某国外成熟的粒子法商业软件结果, 右图为

SimArk Particles 软件结果

时间 t=0.09s 时刻的速度分布云图如图 102 所示,在速度大小以及自由液面的空间 分布上,SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的粒子法商业软件的仿真计算 结果几乎一致。



图 102 t=0.09s 时刻的速度分布云图,左图为某国外成熟的粒子法商业软件结果,右图为 SimArk Particles 软件结果

时间 t=0.494s 时刻的速度分布云图如图 103 所示,在速度大小以及自由液面的空间 分布上, SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的粒子法商业软件的仿真计算 结果吻合度良好。



图 103 t=0.494s 时刻的速度分布云图,左图为某国外成熟的粒子法商业软件结果,右图为 SimArk Particles 软件结果

下图是另外一个齿轮箱搅油润滑场景的仿真对比结果,两者对对自由液面的捕捉, 基本相似。图 104 中,在左下角的大齿轮甩油前沿处(黄色线圈内),SimArk Particle 软件模拟出"甩"的液面,而某国外成熟的粒子法商业软件则是比较光滑的液面。在图 104 和图 105 中,左下角大齿轮的圆周外缘有深窄的凹槽(红色线圈内),会吸附润滑 油随齿轮运动,SimArk Particle 软件能模拟此现象。



图 104 t=0.16s 时刻的自由液面分布云图, 左图为 SimArk Particles 软件结果, 右图为某国外 成熟的粒子法商业软件结果



图 105 t=0.3s 时刻的自由液面分布云图, 左图为 SimArk Particles 软件结果, 右图为某国外成 熟的粒子法商业软件结果

8.3. 与网格法对比验证

SimArk Particles 软件仿真计算结果和网格法(FVM)的仿真计算结果对比,从而 验证求解器精度。

8.3.1. 救生艇自由入水

救生艇下水是海洋工程中相当常见入水问题的典型案例。在极端的海上事故中,救 生艇通常在投放系统的辅助下,通过一个相当高的高度的船只或平台甲板下水。因此, 当它即将穿透水面时,所积累的动能是相当大的,这可能会引起显著的水动力载荷,从 而对救生艇运动稳定性产生巨大的不利影响。

救生艇的几何如图 106 所示, 艇总长 12.57m, 艇总宽 3.34m, 重量 16800kg。



图 106 救生艇的几何

采用某国外成熟的网格法商业软件进行网格划分如图 107 所示。



图 107 网格划分示意图

SimArk Particles 软件粒子生成如图 108 所示。



图 108 粒子划分示意图

入水角度为 50 度, t=0.9s 时刻的仿真结果如图 109 所示, SimArk Particles 软件仿 真计算结果和某国外成熟的网格法商业软件的仿真计算结果几乎一致, 但是粒子法仿真 能得到更为丰富的液体飞溅现象。



图 109 t=0.9s 的仿真结果, 左图为网格法, 右图为粒子法

入水角度为50度下救生艇的位移和速度随时间变化的关系如图 110 所示,SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的网格法商业软件的仿真计算结果误差很小,其结果达到了与商业软件相同的精度。



图 110 救生艇的位移和速度随时间变化, 左图为位移变化, 右图为速度变化

采用 SimArk Particles 软件比 FVM 法仿真液体场景的好处有:一是无需对复杂几何进行严格处理以提高几何质量,节省前处理时间;二是无需划分网格,降低仿真人员的技能要求和节省前处理时间;三是对于流固耦合运动,无需设置复杂的动网格模型参数和多相流模型参数;四是求解速度比 FVM 的快;五是粒子法计算收敛稳定性远远高于FVM 法;六是仿真结果可以得到更丰富的液体现象,如液体飞溅、液膜、液滴等,仿真现象越丰富仿真就越准确。

8.3.2. 飞行器水面迫降

飞行器水上起飞或者降落都伴随着在水上的滑行运动。水面环境不同于陆地跑道,

很多因素都会对水上飞行器的性能产生影响,严重的会导致飞行器产生埋首现象。研究 水上飞行器的滑行过程中的水动力性能对于整个设计至关重要。

水上飞行器滑行过程中存在自由液面飞溅、翻卷、破碎等复杂流体运动,自由液面的剧烈飞溅会对水上飞行器机腹以及机翼产生一定砰击,对水上飞行器的安全性能造成一定危害。而光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)作为一种纯拉格朗日框架的无网格法,在处理此类问题时具有天然的优势。

对比验证的飞行器在水面的初始几何如图 111 所示。为了减少计算资源,数值模拟的对象仅选择水上飞行器的机身部分,机翼等其他附件不纳入模拟范围,水上飞行器纵倾角 5 度。



图 111 飞行器初始状态

采用某国外成熟的网格法商业软件进行网格划分如图 112 所示。



图 112 网格划分示意图

SimArk Particles 软件粒子划分如图 113 所示。



图 113 粒子划分示意图

时间的航速 80 米每秒下的三个不同视角的飞溅结果,图 114 和图 115,SimArk Particles 软件仿真计算结果和某国外成熟的网格法商业软件的仿真计算结果几乎一致,而且粒子法仿真能得到更为丰富的液体飞溅现象。



图 114 某国外成熟的网格法商业软件仿真结果



图 115 SimArk Particles 软件仿真结果

两种不同航速下计算结果对比如图 116 所示, SimArk Particles 软件仿真计算结果和 某国外成熟的网格法商业软件的仿真计算结果误差很小,其结果达到了与商业软件相同 的精度。高航速滑行时自由液面存在飞溅现象,飞行器会受到来自飞溅流体的砰击压力, 由于粒子法可以捕捉到了更多的液体飞溅见图 115,所以其模拟得到的飞机阻力会稍大 于网格法的结果。



图 116 两种航速下的升阻力对比

从上述自由液面云图和受力统计结果分析可得 SimArk Particles 粒子法软件的求解 精度媲美甚至在一定程度上优于 FVM 法,可得到更为丰富的液体行为现象、几乎一致 的受力统计以及更短的计算时间。