

密级：公开

燃油雾化机理研究和数值仿真模型 构建

项目研制工作建议书

项目名称： 燃油雾化机理研究和数值仿真模型构建
项目申报单位： 上海积鼎信息科技有限公司
项目负责人： 傅彦国
研究周期： 6 个月
编制日期： 2020 年 6 月 9 日

上海积鼎信息科技有限公司

目录

1 项目概况.....	4
1.1 原理及需求分析.....	4
1.2 国内外发展现状和趋势.....	4
1.3 必要性分析.....	4
2 研究目标、内容、关键技术和指标.....	5
2.1 研究目标.....	5
2.2 研究内容.....	5
2.2.1 离心喷嘴雾化和横向来流直喷喷嘴雾化的雾化机理研究.....	5
2.2.2 基于 LES 框架一次/二次雾化模型的开发集成	6
2.2.3 雾化模型验证优化.....	6
2.3 关键技术.....	7
2.4 主要指标考核方式.....	7
3 技术可行性和创新点.....	7
3.1 已具备的技术基础及现处阶段.....	7
3.2 拟采用的技术路线和创新性.....	8
3.2.1 总体方案.....	8
3.2.2 技术路线.....	9
3.2.2.1 离心式雾化 Rosin-Rammler 喷射模型开发集成	9
3.2.2.2 离心式雾化 LISA 模型开发集成.....	28
3.2.2.3 直喷式雾化 WAVE 模型开发集成	53
3.2.2.4 二次雾化 KH-RT 模型开发集成.....	67
3.2.2.5 雾化模型测试验证.....	80
3.2.3 创新性.....	80
3.3 技术风险分析与规避措施.....	81
3.3.1 技术风险分析.....	81
3.3.2 构建技术风险预警机制.....	82
3.3.2.1 预警信息监测机制.....	82
3.3.2.2 预警信息分析与对错机制.....	82
3.3.2.3 预警指标机制.....	83
3.3.2.4 预警反馈机制.....	83
4 进度安排、成果形式和应用方向.....	83
4.1 进度安排.....	83
4.2 成果形式.....	84
4.3 应用方向.....	84
5 预期成果和效益.....	84
5.1 成果及成果形式.....	84
5.1.1 研究报告.....	84
5.1.2 软件模块代码.....	85
5.1.3 软件配套文档.....	85
5.1.4 验证算例数据.....	85
5.1.5 试验件.....	85
5.2 应用方向、前景和效益.....	85

6 知识产权分析.....	85
7 经济概算（万元）.....	86
8 合作单位任务分工及经费分配.....	86
9 课题组主要成员.....	86
10 研究条件及保障措施.....	89
10.1 承担单位基本情况.....	89
10.2 研究条件.....	90
10.3 外协条件.....	91
10.4 管理保障.....	91
10.4.1 质量保证计划.....	92
10.4.1.1 编制和评审质量计划.....	92
10.4.1.2 质量检查.....	92
10.4.1.3 不符合项的跟踪处理.....	92
10.4.2 质量管理责任分配.....	92
10.4.2.1 质量保证小组职责.....	93
10.4.2.2 配置管理小组职责.....	93
10.4.2.3 测试小组职责.....	94
10.4.3 质量保证措施.....	94

1 项目概况

1.1 原理及需求分析

燃烧室对于航空发动机的总体性能影响巨大。燃烧室内的燃油雾化过程是其内部工作的一个重要的环节，对燃烧室的点火、燃烧效率、燃烧稳定性以及污染物排放等均有较大的影响。针对航空发动机燃烧室典型燃油喷嘴雾化过程，主要开展离心喷嘴雾锥雾化和横向来流直喷喷嘴雾化的雾化机理研究，进而开发构建基于 LES 框架的一次/二次雾化模型，提供雾化仿真模块。

1.2 国内外发展现状和趋势

雾化过程的数值模拟涉及多相、多尺度的流动过程，对网格尺度、时间尺度要求较高，计算量大，国内外关于雾化过程的三维数值模拟采用的方法大致可以分为欧拉多相流法以及拉格朗日 DPM 方法。欧拉多相流界面捕捉方法多是应用 VOF 或 Level-Set 方法对气液界面进行重构，而 DPM 方法则是应用拉格朗日粒子追踪方法将液滴看作离散的颗粒，通过加入一系列雾化子模型来实现雾化过程的数值计算，其中 DPM 方法在发动机燃烧三维仿真领域具有极重要的工程应用价值。目前在实际工程应用数值模拟中，较为通用的描述雾化过程的方法为欧拉法求解气相流场，拉格朗日法追踪离散的液相油滴群，由于很难将一次雾化从连续状态的液柱或者液膜破碎为离散的大液滴/液块的过程详细的描述出来，因此对于离心式喷雾的初次雾化一般采用 Rosin-Rammler 喷射模型或者 LISA 模型进行简化处理，而对于直射式射流喷雾的初始化一般采用 Blob 方法进行简化处理，进而配合二次雾化模型进行后续计算，目前应用较为广泛的二次雾化模型为 KH-RT 模型。

1.3 必要性分析

目前国际上主流的商业燃烧仿真软件基本具备了较为完备的发动机雾化仿真模块，但因其商业封闭致使发动机设计工程人员无法深入了解其黑匣子背后的

模型理论算法；而国内自主软件方面虽然也集成了一些主流的雾化仿真模型，但大多局限于高校等基础研究院所的学术研究层面，真正面向发动机设计过程中的工程仿真应用层面的功能不够完善。因此，为了减小我国在航空发动机基础研究方面与国外先进水平的差距，进一步推动先进发动机燃烧室的设计研发，需要在燃油雾化机理探索和模型开发优化等方面开展深入的研究，力求提升燃油雾化数值模拟预测精度，为推进数值仿真技术在航空发动机工程设计上的应用提供支撑，从而满足我国航空发动机自主研发的需要，也契合我国在航空领域对“正向设计”工具的研发要求。

2 研究目标、内容、关键技术和指标

2.1 研究目标

针对航空发动机燃烧室典型燃油喷嘴雾化过程，主要开展离心喷嘴雾锥雾化和横向来流直喷喷嘴雾化的雾化机理研究，分析不同来流条件对燃油雾化特性的影响规律，深入研究喷嘴雾化的过程和机理，进而开发构建基于 LES 框架的一次/二次雾化模型，将模型与航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真程序集成，并与试验数据进行对比验证，为航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真研究提供必要的雾化仿真模块。

2.2 研究内容

2.2.1 离心喷嘴雾化和横向来流直喷喷嘴雾化的雾化机理研究

通过对国内外航空发动机燃烧室离心式、直喷式雾化过程相关试验研究和数值模拟研究方法的调研，分析不同来流条件对燃油雾化特性的影响规律，深入研究喷嘴雾化的过程和机理，形成雾化数值仿真模型开发的理论基础。同时基于离心喷嘴试验件和直射喷嘴试验件开展雾化特性的试验研究，获得可对离心喷嘴和直射喷嘴雾化模型验证的雾化数据，用于后续计算仿真的验证。

2.2.2 基于 LES 框架一次/二次雾化模型的开发集成

在模型开发集成方面，在 LES 框架下采用欧拉-拉格朗日方法处理气液两相耦合，其中气相将采用欧拉方法，数值计算方法基于任意形式的非结构网格和同位网格压力速度求解算法。液相将采用拉格朗日方法对流场液滴运动进行描述采用一定数量的 parcel（液滴包）来代替所有液滴，通过对各 parcel 的追踪，从而实现对液相的模拟。

针对离心喷嘴的雾锥雾化，一次雾化模型主要开发构建空心锥结合 Rosin-Rammler 分布喷射模型、线性不稳定液膜雾化 LISA 模型两种模型；二次雾化模型主要开发构建不稳定雾化 KH-RT 模型。针对直喷喷嘴的横向射流雾化，一次雾化模型主要开发构建 WAVE 模型；二次雾化模型主要开发构建 KH-RT 模型。进而将模型与航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真程序集成。

2.2.3 雾化模型验证优化

针对离心喷嘴和直喷喷嘴开展雾化流场的数值模拟研究，根据两种喷嘴的雾化宏观形态以及液滴微观粒径、速度等试验数据对雾化模型进行验证与优化，并形成标准算例。

根据离心喷嘴试验获取液滴粒径及分布、液滴速度等试验数据。在常温常压来流条件下验证雾锥雾化模型的液滴直径和速度分布仿真结果。试验采用单个离心喷嘴，试验状态参数范围： $20 < We < 700$ ，动量比 $40 \sim 100$ ，通过 PDPA 测量液雾 SMD 数据。

根据横向来流条件下的直喷喷嘴试验获取液滴粒径及分布、液滴速度等试验数据。在常温常压来流条件下验证横向来流条件下的直喷雾化模型的液滴直径和速度分布仿真结果。直喷喷嘴喷雾试验状态参数范围： $30 < We < 170$ ，动量比 $10 \sim 30$ ，通过 PDPA 测量液雾 SMD 数据。

2.3 关键技术

本项目旨在将 Rosin-Rammler、LISA、WAVE、KHRT 等雾化模型集成到甲方要求的仿真平台。雾化模型的程序实现参考 OpenFOAM 开源代码以及 KIVA 代码，同时在理论模型与功能要求上借鉴 Fluent、StarCCM+等商用软件，便于用户的理解和使用。采用模块化设计，提供模块接口，提高代码的可移植性，方便后续开发。

关键技术包括：1，雾化模型的代码模块化集成技术；2，一次雾化模块与二次雾化模块的耦合技术；3，雾化模块的整体健壮性；4，拉格朗日颗粒追踪技术。

2.4 主要指标考核方式

针对离心式喷嘴雾化模型，在 $20 < \text{We} < 700$ 、动量比 40-100 条件下，离心雾化算例获得的雾化锥角预测值与试验值偏差不大于 15%，油雾场 SMD 值计算误差不大于 15%，液滴速度计算误差不大于 15%；

针对直喷式喷嘴雾化模型，在 $30 < \text{We} < 170$ 、动量比 10-30 条件下，直喷雾化算例获得的穿透深度预测值与试验值偏差不大于 15%，穿透轨迹预测值与试验值趋势一致，最大偏差不大于 20%，油雾场 SMD 值计算误差不大于 15%。

3 技术可行性和创新点

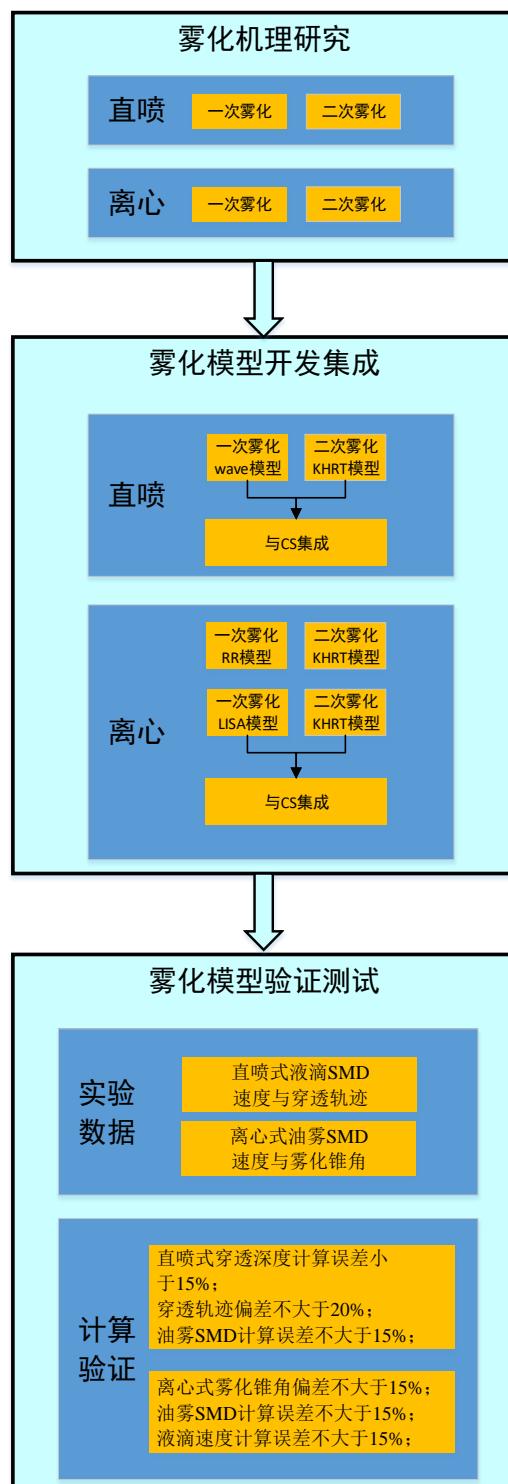
3.1 已具备的技术基础及现处阶段

本团队已就项目内容涉及的所有一次/二次雾化模型（RR 喷射模型、LISA 模型、KHRT 模型以及 WAVE 模型）展开了充分的调研，并通过开源 CFD 代码对物理模型的数值实现有了充分的理解。此外，本团队对现有代码的欧拉-拉格朗日方法模块已经具备了框架性的认识与理解。目前，本团队对于该项目要求的机理模型调研工作均已完成，并基于甲方单位要求的程序平台提出了较为详细的两相雾化程序重构实施方案。

3.2 拟采用的技术路线和创新性

3.2.1 总体方案

本研究根据甲方要求，基于 Code_Saturne 4.0 版本，按如下方案开展工作。



3.2.2 技术路线

3.2.2.1 离心式雾化 Rosin-Rammler 喷射模型开发集成

3.2.2.1.1 技术路线图

图 3-1 给出喷点喷射设计图。

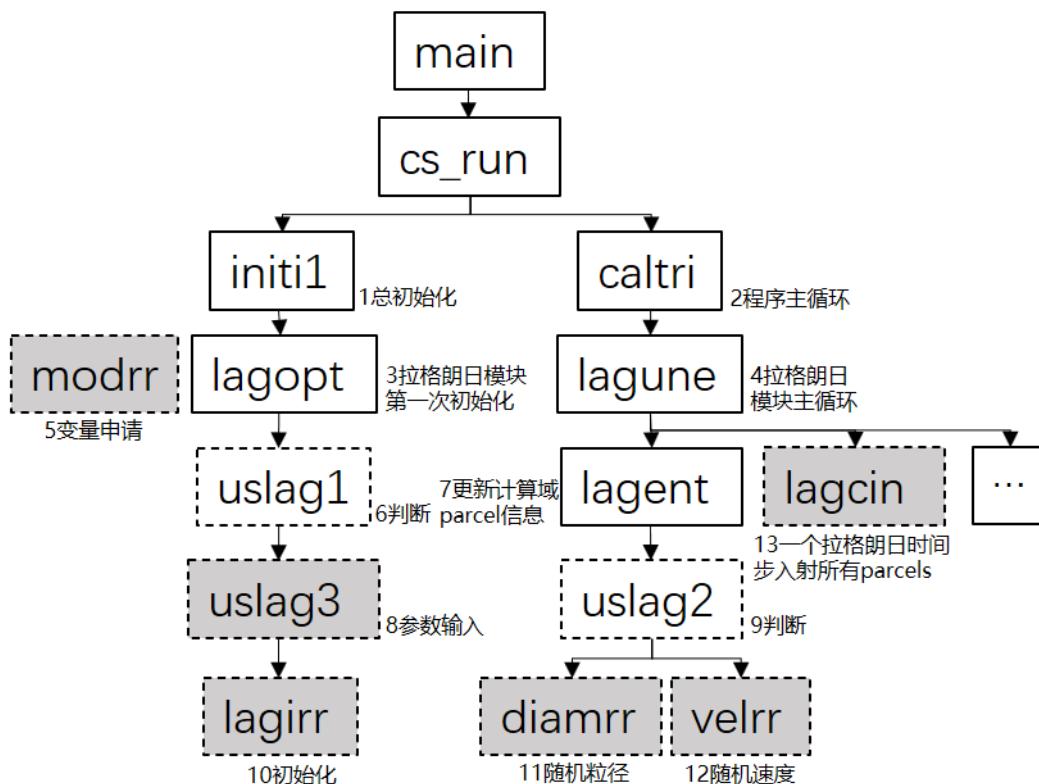


图 3-1 Rosin-Rammler 喷点喷射模型模块设计图

- ✓ 白色实线框表示 CS 既有子程序，无需修改；
- ✓ 白色虚线框表示 CS 既有子程序，但需要根据 RR 喷点喷射模块做适应性修改，比如增加开关参数；
- ✓ 灰色虚线框为开发者添加子程序。

以下是逻辑流程图的具体说明：

- 1, CS4 总初始化子程序;
- 2, CS4 主循环计算子程序;
- 3, 拉格朗日模块首次初始化子程序, 负责包括: 拉格朗日配置初始化、读取用户设置、验证用户设置及一致性检查等。
- 4, 拉格朗日模块主循环计算子程序;
- 5, Rosin-Rammler 分布模型模块的变量声明, 定义数据结构。输入参数包括喷嘴位置、喷嘴方向、喷嘴直径, 总质量流率、喷点数目、时间步长、喷射终止时刻、parcel 数目, parcel 的数目属性、parcel 的粒径上下限、RR 分布参数, 以及 RR 控制开关参数。所有虚线框文件都需要调用该 module。开关参数 irr=1 表示调用该 RR 模块, irr=0 表示忽略 RR 模块。
- 6, 原拉格朗日模块计算参数设置文件, 需要增加开关判断参数, 以适应 RR 模块;
- 7, 更新计算域 parcel 信息;
- 8, Rosin-Rammler 点喷射模块参数设置及读入;
- 9, 原拉格朗日模块 parcel 入射位置、边界条件、种类及属性设置文件。这里需要根据 RR 模块做适应性修改, 增加开关判断参数;
- 10, RR 模块初始化子程序, 负责计算喷点的位置;
- 11, 根据 RR 分布累积函数, 确定 parcel 的随机粒径;
- 12, 根据雾化半锥角、分散角等参数, 引入速度的方向随机, 确定笛卡尔坐标系中的三个速度分量。速度的大小可以通过喷嘴内外压差计算获得。
- 13, 处理本拉格朗日时间步新入射 parcel, 将新入 Parcel 加入到已有 Parcel 序列中, 更新计算域内所有 parcel 信息属性数组。

图 3-2 给出面喷射设计图。

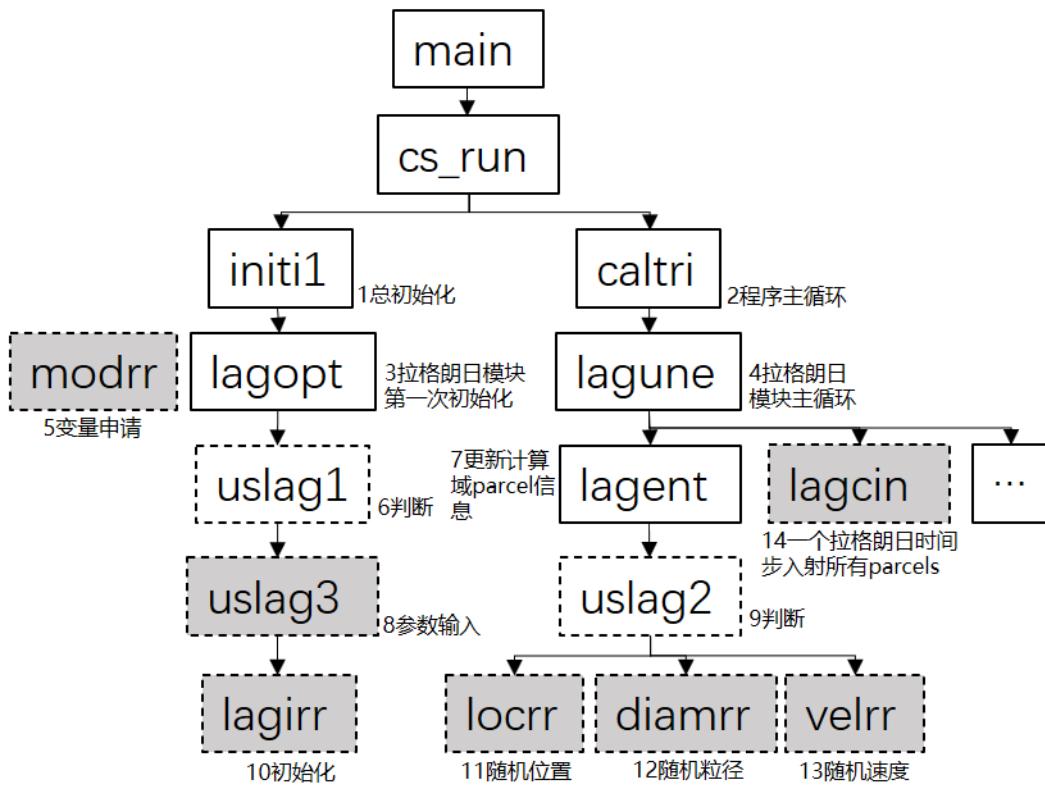


图 3-2 Rosin-Rammler 面喷射模型模块设计图

- ✓ 白色实线框表示 CS 既有子程序，无需修改；
- ✓ 白色虚线框表示 CS 既有子程序，但需要根据 RR 喷点喷射模块做适应性修改，比如增加开关参数；
- ✓ 灰色虚线框为开发者添加子程序。

10，初始化部分，初始化喷嘴位置，不涉及喷点。

11，喷点的位置随机子程序，现移至 RR 面喷射模块的循环计算部分。

其它：与 RR 喷点喷射流程图相同。

如图 3-2 所示，parcel 入射包括初始化设置与循环结构。

3.2.2.1.1.1 初始化设置

通过用户输入参数确定喷点位置。通过压差（或流量）计算得到 parcel 总速度大小。

3.2.2.1.1.2 喷点入射循环体结构

以喷点入射方式为例，得到一个简要的入射过程结构。

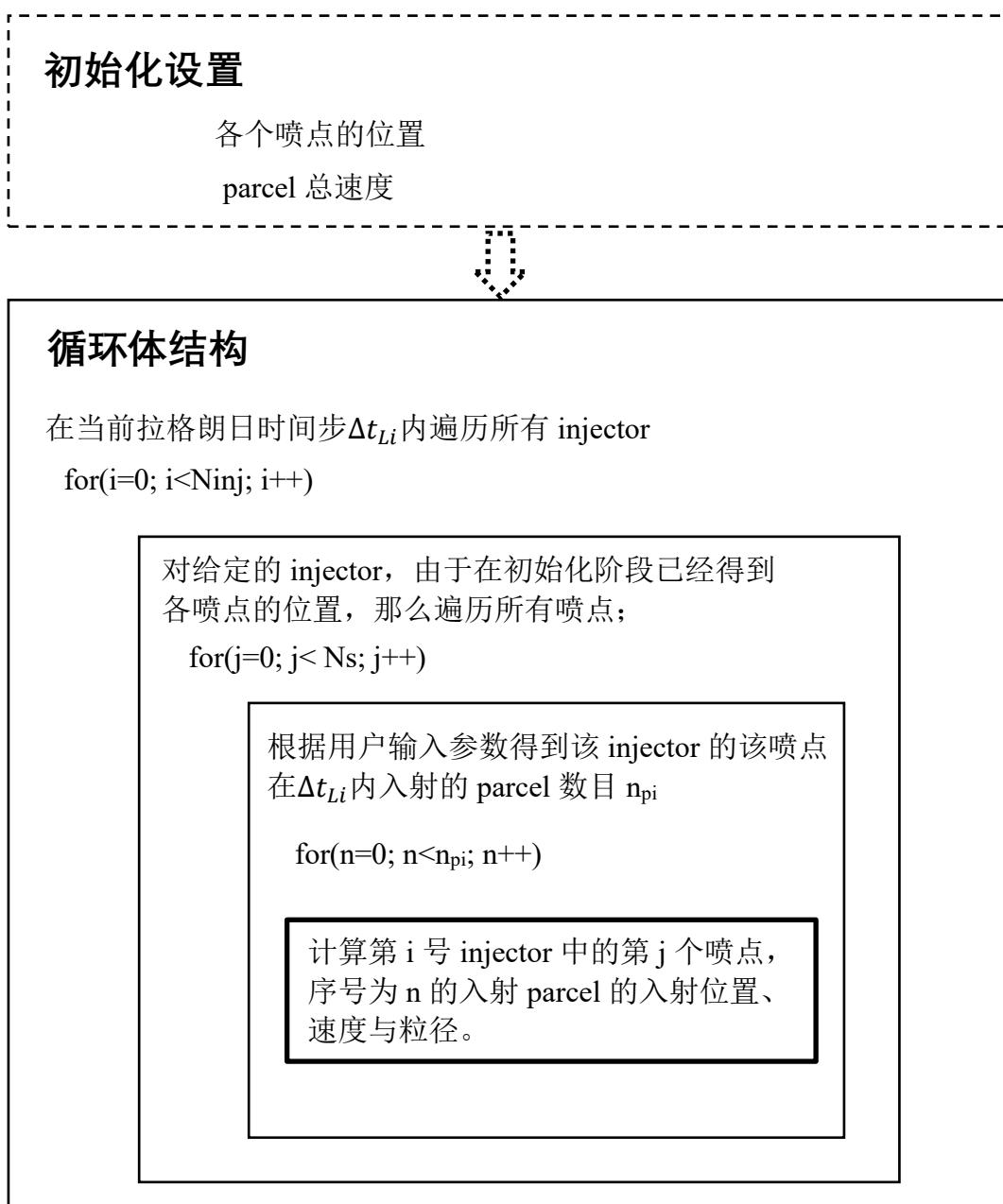


图 3-3 喷点入射过程示意图

3.2.2.1.1.3 面入射循环体结构

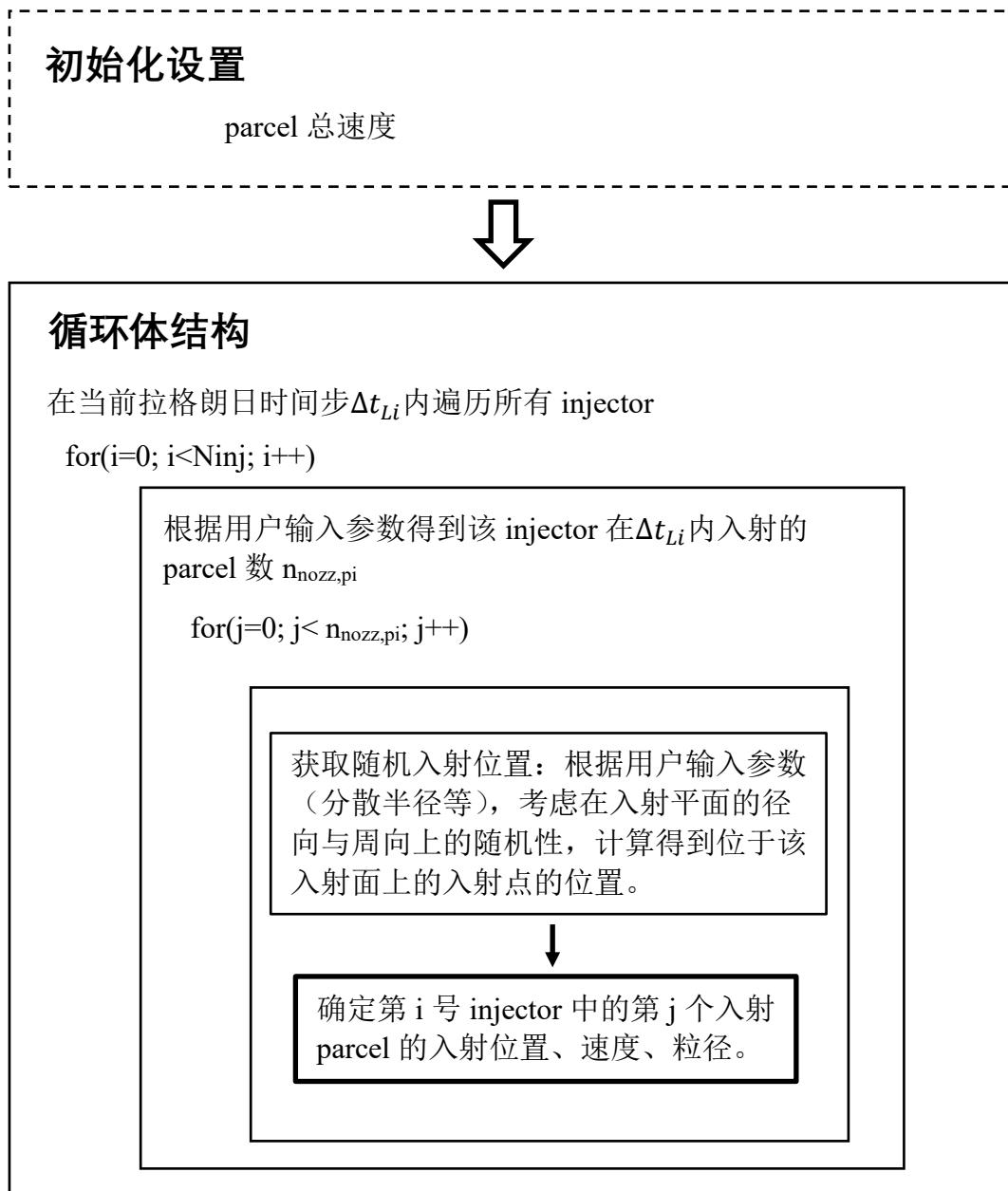


图 3-4 面入射过程示意图

3.2.2.1.1.4 与二次雾化耦合关系

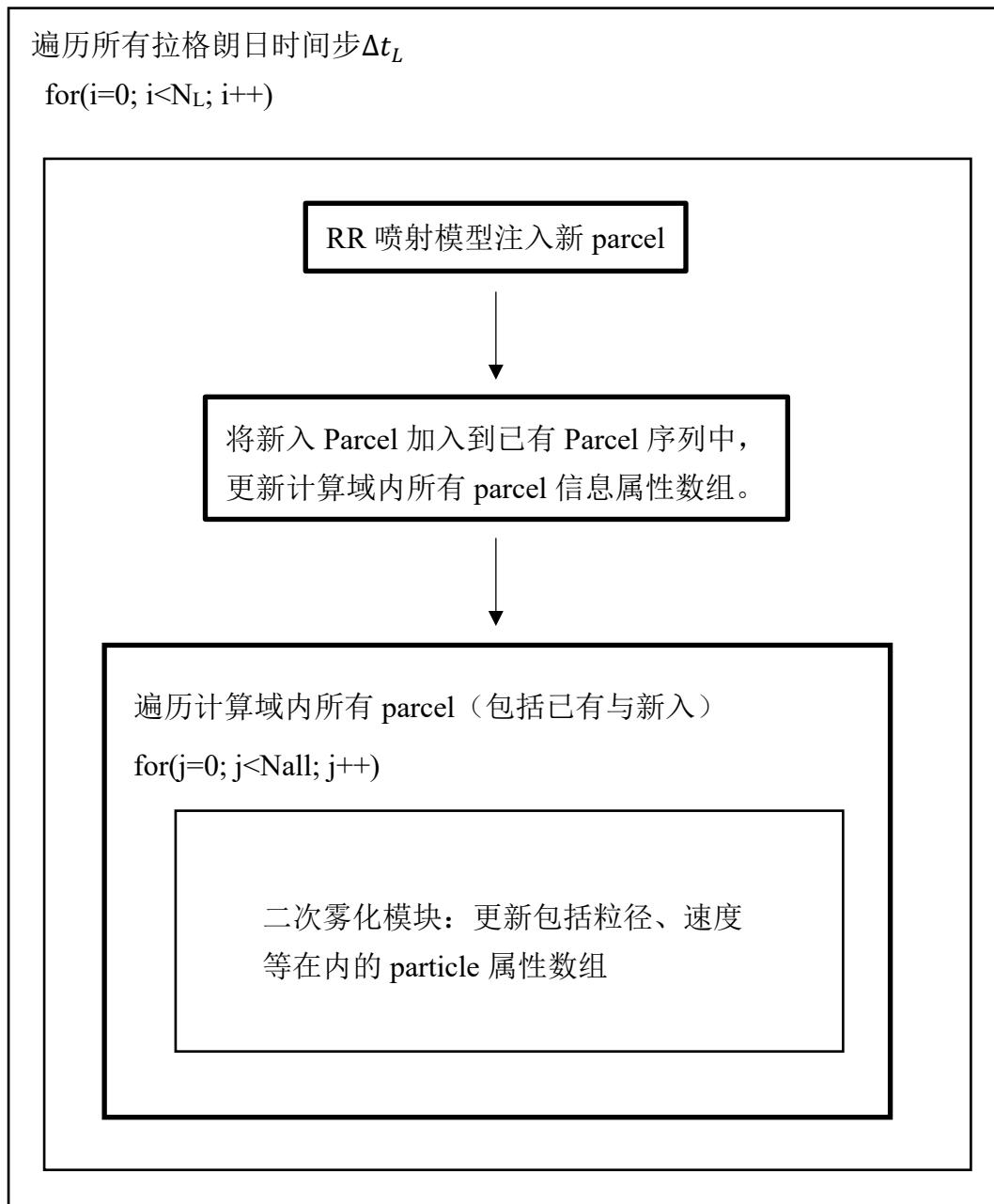


图 3-5 雾化破碎模块的计算迭代示意图

3.2.2.1.2 理论介绍

参数列表:

D	RR 平均代表直径	m
D_p	parcel 中颗粒粒径	mm
M_i	每一喷点第 <i>i</i> 个拉格朗日时间步长内入射的 parcel 质量	kg
$M_{nozz,i}$	单个喷嘴第 <i>i</i> 个拉格朗日时间步长内入射的 parcel 质量	kg
\dot{M}	单喷嘴喷射总质量流率	kg s^{-1}
m_{pi}	Δt_{Li} 时间步内的单个 parcel 的质量	kg
N	第 N 个喷点	
N_L	拉格朗日时间步数	
N_{inj}	injector 个数	
N_{all}	计算域内所有 parcel 总数	
$N_{nozz,p}$	单个喷嘴在整个喷射期内喷射的 parcel 总数	
N_p	每一喷点在整个喷射期内喷射的 parcel 总数	
N_s	某喷嘴的喷点总数目	
n_{part}	每个 parcel 内含的 particle 数量	
n_{pi}	Δt_{Li} 时间步内单喷点 parcel 数量	
$n_{nozz,pi}$	Δt_{Li} 时间步内整个喷射面 parcel 数量	
\dot{n}_p	每一喷点单位时间注入的 parcel 数量 \dot{n}_p	s^{-1}
$\dot{n}_{nozz,p}$	单个喷嘴单位时间注入的 parcel 数量 \dot{n}_p	s^{-1}
\vec{n}_r	柱坐标径向方向单位矢量	
\vec{n}_{ref}	喷嘴参考方向	
\vec{n}_t	柱坐标切向方向单位矢量	
\vec{P}_{inj}	parcel 入射位置	m
\vec{P}_{nozz}	喷嘴位置	m
q	RR 分布参数	
r	环形喷射面的某喷射点到中心的距离	m
r_1	环形喷射面内部半径	m
r_2	环形喷射面外部半径	m

r_{disp}	喷点的分散半径	m
SF	旋流比	
t_i	第 i 个拉格朗日时间步起始时刻	s
t_{start}	喷射开始时间	s
t_{end}	喷射结束时间	s
\vec{t}_1	垂直参考方向的某一单位向量, 在入射平面内	
\vec{t}_2	垂直参考方向的另一单位向量	
Δt_L	泛指拉格朗日时间步长统称	s
Δt_{Li}	第 i 个拉格朗日时间步步长	s
V_p	喷嘴出口处喷射速度大小	m s^{-1}
\vec{V}_{cone}	轴向速度与径向速度的合成速度	m s^{-1}
\vec{V}_p	parcel 速度	m s^{-1}
\vec{V}_{swirl}	切向速度	m s^{-1}
x_{min}	particle 最小直径	m
x_{max}	particle 最大直径	m
希腊字母		
α	位置矢量与 \vec{t}_1 间的夹角	rad
ρ_l	液滴密度	kg m^{-3}
θ	入射方向与参考方向间的夹角	rad
θ_0	喷点入射的雾化半锥角	rad
θ_{disp}	分散角	rad
$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	[0,1]区间的随机数	

输入、输出参数列表 checklist:

操作步骤	喷点位置	Parcel 的数量、质量与入射时刻	Parcel 的 Rosin-Rammler 分布随机	Parcel 速度大小及方向
------	------	--------------------	-----------------------------	----------------

				粒径	
输入参数	\bar{D}			✓	
	\dot{M}		✓		
	$N_{nozz,p}$		✓		
	N_p		✓		
	N_s	✓	✓		
	\vec{n}_{ref}	✓			
	\vec{P}_{nozz}	✓			
	q			✓	
	r_{disp}	✓			
	SF				✓
	t_i		✓		
	t_{start}		✓		
	t_{end}		✓		
	Δt_{Li}		✓		
	V_p				✓
	x_{min}			✓	
	x_{max}			✓	
	ρ_l			✓	
输出参数	θ_0				✓
	θ_{disp}				✓
	ξ_1			✓	
	ξ_2				✓
	ξ_3				✓
输出参数	ξ_4				✓
	D_p			✓	
	m_{pi}		✓		
	n_{part}			✓	
	$[n_{pi}]$		✓		

	$[n_{nozz,pi}]$		✓		
	\vec{P}_{inj}	✓			
	\vec{V}_p				✓

3.2.2.1.2.1 喷点位置

如果是点入射以及由此扩展的喷点入射方式，需要在初始化阶段确定各喷点的位置。

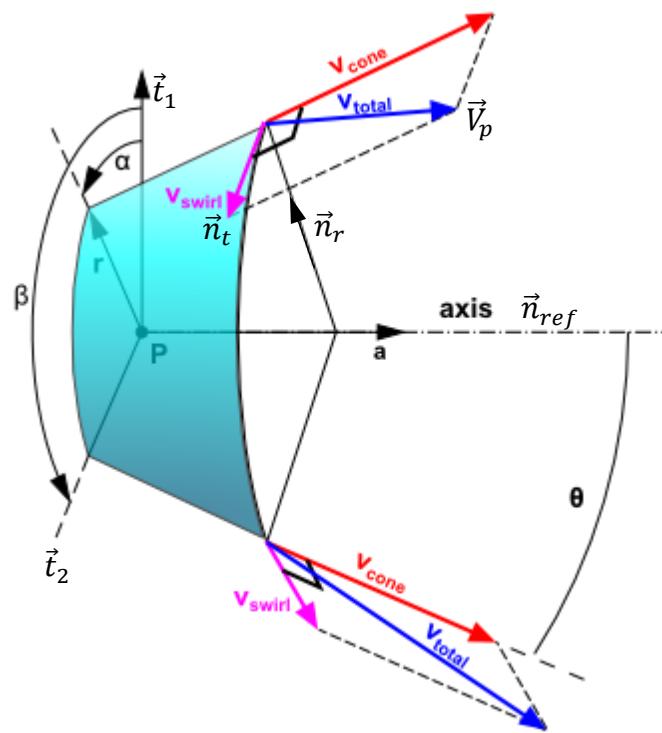


图 3-6 锥形入射几何与速度分量

图 3-6 给出锥形入射的几何， \vec{n}_{ref} , \vec{t}_1 , \vec{t}_2 组成了直角坐标系。在给定 \vec{n}_{ref} 的前提下，通过下式给出 \vec{t}_1 。

$$\vec{t}_1 = \frac{1}{|\vec{t}_1|} (1 - n_{refx}^2, -n_{refx}n_{refy}, -n_{refx}n_{refz}) \quad (3.2.2.1-1)$$

其中，

注意： $t1 = (1, 0, 0)$ 情况

$$|t_1| = \left[(1 - n_{refx}^2)^2 + n_{refx}^2 n_{refy}^2 + n_{refx}^2 n_{refz}^2 \right]^{1/2} \quad (3.2.2.1-2)$$

因为，

$$\begin{aligned} & (1 - n_{refx}^2, -n_{refx} n_{refy}, -n_{refx} n_{refz}) \cdot (n_{refx}, n_{refy}, n_{refz}) \\ &= n_{refx} (1 - n_{refx}^2 - n_{refy}^2 - n_{refz}^2) = 0 \end{aligned} \quad (3.2.2.1-3)$$

这样显然有 $\vec{n}_{ref} \cdot \vec{t}_1 = 0$ 。

而由下式给出 \vec{t}_2 。

$$\vec{t}_2 = \vec{n}_{ref} \times \vec{t}_1 \quad (3.2.2.1-4)$$

图 3-6 中，还给出了另一组柱坐标系 \vec{n}_{ref} , \vec{n}_r , \vec{n}_t , 分别指轴向、径向与切向。 α 为径向 \vec{n}_r 与 \vec{t}_1 夹角。

径向方向 \vec{n}_r 由坐标轴 \vec{t}_1, \vec{t}_2 以及夹角 α 给定，

$$\vec{n}_r = \cos \alpha \vec{t}_1 + \sin \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.1-5)$$

而切向方向为

$$\vec{n}_t = -\sin \alpha \vec{t}_1 + \cos \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.1-6)$$

对于第 N 个喷点，不妨取

N \in [1, Ns]

$$\alpha = \frac{2\pi}{N_s} (N - 1) \quad (3.2.2.1-7)$$

上式中 N_s 为喷点总数。

$$\vec{P}_{inj} = \vec{P}_{nozz} + r_{disp} \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-8)$$

那么，上式就给定了离心式喷嘴 N_s 个喷点的位置。

3.2.2.1.2.2 Parcel 的数量、质量与入射时刻

3.2.2.1.2.2.1 喷点入射

对于所有喷点，每个喷点单位时间内喷射质量以及喷射的 Parcel 数目假定是相同的，基于此先确定在一个拉格朗日时间步长 Δt_L 内，单个喷点中的入射 parcel 的质量与数量。通过质量流率容易计算得到第*i*个拉格朗日时间步长 Δt_{Li} 注入到单个喷点中的 parcel 质量 M_i 。

$$M_i = \frac{1}{N_s} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{M} dt = \frac{1}{N_s} \dot{M} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.1-9)$$

单个喷点单位时间注入 parcel 数量 \dot{n}_p

$$\dot{n}_p = \frac{N_p}{t_{end} - t_{start}} \quad (3.2.2.1-10)$$

单个喷点在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内注入的 parcel 数量

$$n_{pi} = \dot{n}_p \Delta t_{Li} = \frac{N_p}{t_{end} - t_{start}} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.1-11)$$

考虑到 n_{pi} 的取整微调操作，上式还需要做进一步修正。将 n_{pi} 做四舍五入，得到单个喷点在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内注入的 parcel 数量

$$[n_{pi}] \equiv \text{int}(n_{pi} + 0.49) \quad (3.2.2.1-12)$$

而该拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内单个 parcel 的质量为

分子分母都有\Delta t_{Li}，如果去除取整的影响，
每个parcel的质量是和时间步长无关的。

$$m_{pi} = \frac{M_i}{[n_{pi}]} \quad (3.2.2.1-13)$$

于是，在当前拉格朗日时间步起始时刻 t_i 在该喷点同时入射 $[n_{pi}]$ 个 parcel。

3.2.2.1.2.2.2 面入射

同样先确定在一个拉格朗日时间步长 Δt_L 内，该喷嘴由面上入射到计算域内的 parcel 的质量与数量。通过质量流率容易计算得到第*i*个拉格朗日时间步长 Δt_{Li}

注入的 parcel 质量 $M_{nozz,i}$ 。

$$M_{nozz,i} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{M} dt = \dot{M} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.1-14)$$

单位时间通过该喷嘴注入的 parcel 数量 $\dot{n}_{nozz,p}$

$$\dot{n}_{nozz,p} = \frac{N_{nozz,p}}{t_{end} - t_{start}} \quad (3.2.2.1-15)$$

那么拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内通过该喷嘴注入的 parcel 数量

$$n_{nozz,pi} = \dot{n}_p \Delta t_{Li} = \frac{N_{nozz,p}}{t_{end} - t_{start}} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.1-16)$$

将 $n_{nozz,pi}$ 做四舍五入，得到该喷嘴在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内注入的 parcel 数量

$$[n_{nozz,pi}] \equiv \text{int}(n_{pi} + 0.49) \quad (3.2.2.1-17)$$

而该拉格朗日时间步内单个 parcel 的质量为

$$m_{pi} = \frac{M_{nozz,i}}{[n_{pi}]} \quad (3.2.2.1-18)$$

于是，在当前拉格朗日时间步起始时刻 t_i 在面上同时入射 $[n_{nozz,pi}]$ 个 parcel。

3.2.2.1.2.3 Parcel 的 Rosin-Rammler 分布随机粒径

Rosin-Rammler 累计分布函数 CDF

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{D}\right)^q} \quad (3.2.2.1-19)$$

上式表示的是粒径小于 x 的 particle 的质量占总质量的比例。换句话说，对于一系列质量相等的 parcel，放入每个 bin（其粒径范围 $x_1 < x < x_2$ ）中的 parcel 的数量与该 bin 的 pdf 积分值成正比。

$$n_p \propto y(x_2) - y(x_1) \quad (3.2.2.1-20)$$

一般我们只关心粒径在区间 $[x_{min}, x_{max}]$ 内的情况，那么(19)式针对 $(0, +\infty)$ 上

的分布就需要修正，而修正之后的 CDF 函数 $y^r(x)$ 在定义域 $[x_{min}, x_{max}]$ 上需要与原来的 CDF 函数 $y(x)$ 满足线性关系。由式(19)粒径范围在 $[x_{min}, x_{max}]$ 的概率是

$$\begin{aligned} y|_{x_{min}}^{x_{max}} &= e^{-\left(\frac{x_{min}}{D}\right)^q} - e^{-\left(\frac{x_{max}}{D}\right)^q} \\ &= e^{-\left(\frac{x_{min}}{D}\right)^q} \left(1 - e^{-\left(\frac{x_{max}}{D}\right)^q + \left(\frac{x_{min}}{D}\right)^q}\right) \end{aligned} \quad (3.2.2.1-21)$$

即

$$y|_{x_{min}}^{x_{max}} = K e^{-\left(\frac{x_{min}}{D}\right)^q} \quad (3.2.2.1-22)$$

其中，

$$K = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x_{max}}{D}\right)^q + \left(\frac{x_{min}}{D}\right)^q \right] \quad (3.2.2.1-23)$$

因为定义域由 $(0, \infty)$ 变为 $[x_{min}, x_{max}]$ ，那么修正过后的分布 $y^r(x)$ 需要满足

$$y^r(x_{min}) = 0 \quad (3.2.2.1-24)$$

与

$$y^r(x_{max}) = 1 \quad (3.2.2.1-25)$$

不妨令

$$y^r(x) - y^r(x_{min}) = \frac{[y(x) - y(x_{min})]}{y|_{x_{min}}^{x_{max}}} \quad (3.2.2.1-26)$$

这样，既可以使 $y^r(x)$ 与 $y(x)$ 保持线性关系，又使得 $y^r(x)$ 在区间 $[x_{min}, x_{max}]$ 上的累计概率为 1 (也即 $y^r(x_{max}) - y^r(x_{min}) = 1$)。

联立式(19)(24)(26)得到修正过后的 RR 分布关系式为

$$y^r(x) = \frac{1}{K} \left[1 - \exp \left(-\left(\frac{x}{D}\right)^q + \left(\frac{x_{min}}{D}\right)^q \right) \right] \quad (3.2.2.1-27)$$

上式 $x \in [x_{min}, x_{max}]$, $y^r \in [0, 1]$ 。那么将 y^r 看作 $[0, 1]$ 内的均匀分布(uniform distributed)的随机数 ξ_1 ，则有

$$x = \bar{D} \left[\left(\frac{x_{min}}{\bar{D}} \right)^q - \ln(1 - K\xi_1) \right]^{1/q} \quad (3.2.2.1-28)$$

因此粒径可由随机数 ξ_1 得到。即给定

$$D_p = x \quad (3.2.2.1-29)$$

由此可进一步计算得到 parcel 中 particle 数量。通过式(13)或式(18)我们已知 m_{pi} , 假定液滴为球形, 则

$$n_{part} = \frac{m_{pi}}{\rho_l \frac{1}{6} \pi D_p^3} \quad (3.2.2.1-30)$$

3.2.2.1.2.4 Parcel 的速度大小及方向

对于 parcel 的入射, 总体上来说有两种方式, 一种是点入射方式; 另一种是面入射方式。

3.2.2.1.2.4.1 喷点入射

这种方法的思路是, 首先确定空心锥喷点的位置, 然后再确定 parcel 的入射速度方向与大小。其中速度方向上加入分散角(dispersion angle) θ_{disp} , 从而在方向上引入了随机性。

一个喷嘴的各喷点之间, 速度处理是否一样?

图 3-6 给出锥形入射的几何与速度分量, 其中 \vec{V}_{swirl} 表示切向 (或周向) 速度分量, 而 \vec{V}_{cone} 表示轴向与径向方向上的合成速度, 而 \vec{V}_{total} 表示总速度($V_{total} = V_p$)。图 3-6 中 θ 表示雾化半锥角,

$$\theta = \theta_0 + \left(\xi_2 - \frac{1}{2} \right) \theta_{disp} \quad (3.2.2.1-31)$$

记 \vec{n}_{cone} 为 \vec{V}_{cone} 的单位矢量。如图 3-7 所示, 长度为 1 的 \vec{n}_{cone} 在轴向 \vec{n}_{ref} 的投影长度为 $\cos \theta$, 在径向 \vec{n}_r 的投影长度为 $\sin \theta$, 那么有:

$$\vec{n}_{cone} = \cos \theta \vec{n}_{ref} + \sin \theta \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-32)$$

自乘即可确认该矢量是单位长度

其中 \vec{n}_r 是 \vec{V}_{cone} 在横截面内投影的单位向量，如图 3-7 所示。

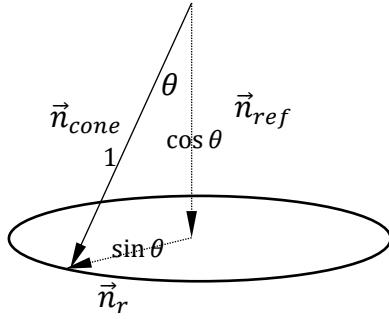


图 3-7 \vec{V}_{cone} 速度分量示意图

\vec{V}_{swirl} 的方向即为切向 \vec{n}_t 。Fluent 手册中的旋流分数定义

$$|SF| \equiv \frac{|\vec{V}_{swirl}|}{|\vec{V}_{cone}| + |\vec{V}_{swirl}|} \quad (3.2.2.1-33)$$

手册中还提到，*The direction of the swirl component is defined using the right-hand rule about the cone axis (a negative value for the swirl fraction can be used to reverse the swirl direction).* 那么当 \vec{V}_{swirl} 方向与 \vec{n}_t 一致时，旋流比大于 0；当 \vec{V}_{swirl} 方向与 \vec{n}_t 相反时，则旋流比小于 0。

总速度

$$V_p = \sqrt{V_{swirl}^2 + V_{cone}^2} \quad (3.2.2.1-34)$$

联立(33)(34)可分别求解得到 V_{swirl} 与 V_{cone} ，

$$V_{swirl} = \frac{V_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{1 - |SF|}{|SF|}\right)^2}} \quad (3.2.2.1-35)$$

$$V_{cone} = \frac{V_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{|SF|}{1 - |SF|}\right)^2}} \quad (3.2.2.1-36)$$

再联立式(6)(32)(35)(36)可以得到 parcel 入射速度 \vec{V}_p 。

$$\vec{V}_p = V_{cone} \vec{n}_{cone} + \text{sign}(SF) V_{swirl} \vec{n}_t \quad (3.2.2.1-37)$$

3.2.2.1.2.4.2 面入射

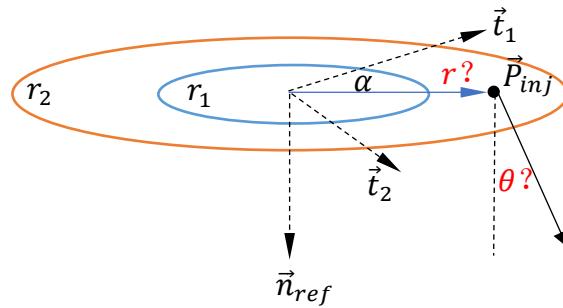


图 3-8 面入射喷射点位置以及喷射方向示意图

该方法的思路是，首先确定入射点的位置（位于图 3-8 中的环形区域），然后再确定入射速度方向。

入射点位置的确定涉及两方面的随机性，一是周向方向（ \vec{P}_{inj} 与坐标轴 \vec{t}_1 的夹角 α 的随机性），二是径向距离 r 。

$$\alpha = 2\pi\xi_3 \quad (3.2.2.1-38)$$

而径向距离

$$r = r_1 + \xi_4(r_2 - r_1) \quad (3.2.2.1-39)$$

其中，

$$r_1 = r_{disp} \frac{\tan\left(\theta_0 - \frac{1}{2}\theta_{disp}\right)}{\tan\theta_0} \quad (3.2.2.1-40)$$

$$r_2 = r_{disp} \frac{\tan\left(\theta_0 + \frac{1}{2}\theta_{disp}\right)}{\tan\theta_0} \quad (3.2.2.1-41)$$

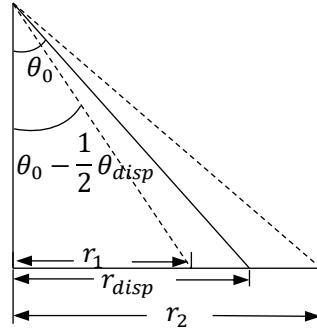


图 3-9 面喷射分散半径示意图

由此，我们得到入射点的位置是

$$\vec{P}_{inj} = \vec{P}_{nozz} + r \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-42)$$

式中，

$$\vec{n}_r = \cos\alpha \vec{t}_1 + \sin\alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.1-43)$$

入射位置确定好之后，再确定入射方向 θ ，即

$$\tan\theta = \frac{r}{r_{disp}} \tan\theta_0 \quad (3.2.2.1-44)$$

而速度 \vec{V}_{cone} 方向

$$\vec{n}_{cone} = \cos\theta \vec{n}_{ref} + \sin\theta \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-45)$$

考虑旋流比 SF 之后，同样有

$$\vec{V}_p = V_{cone} \vec{n}_{cone} + \text{sign}(SF) V_{swirl} \vec{n}_t \quad (3.2.2.1-46)$$

上式中的各变量参考式(6)(32)(35)(36)。

3.2.2.1.3 参考文献

[1] Lefebvre, A.H. & McDonell, V. G., Atomization and sprays. CRC Press, 2017

[2] Persson, A., Description and implementation of particle injection in OpenFOAM - Developed for OpenFOAM 1.7x, Tech. Report, 2010

3.2.2.2 离心式雾化 LISA 模型开发集成

3.2.2.2.1 技术路线图

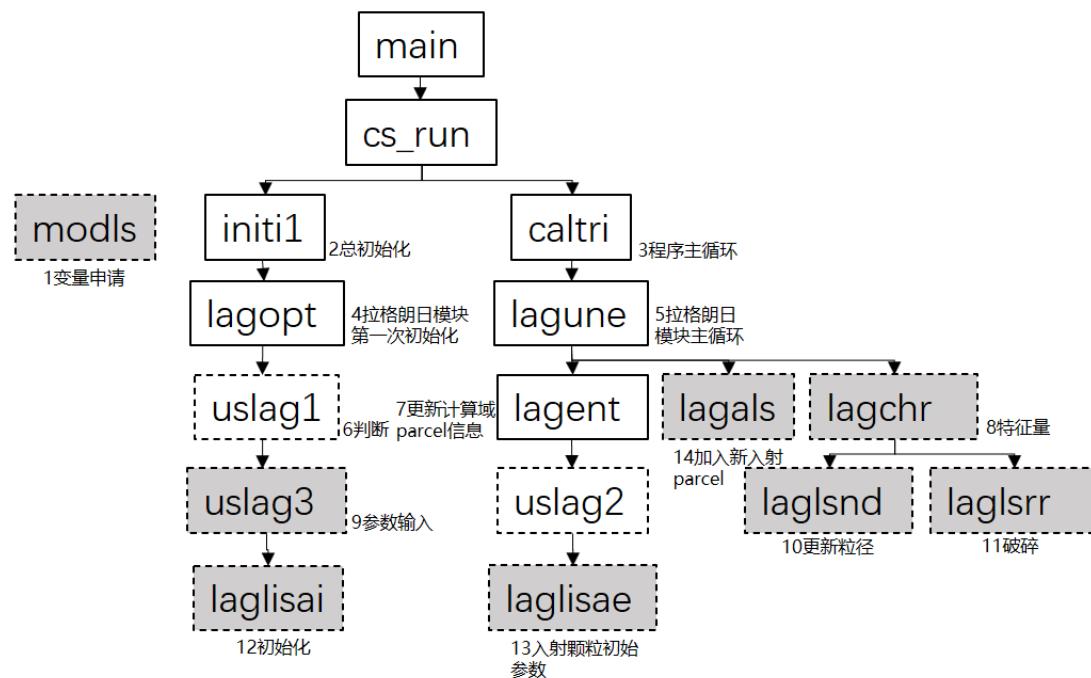


图 3-10 一次雾化 LISA 模型模块设计图

- ✓ 白色实线框表示 CS 既有子程序，无需修改；
- ✓ 白色虚线框表示 CS 既有子程序，但需要根据 RR 点喷射模块做适应性修改，比如增加开关参数；
- ✓ 灰色虚线框为开发者添加子程序。

以下是代码流程图 3-10 的具体说明：

- 1, LISA 雾化模型相关变量声明。liquidCore 属性可在 ipepa 数组中加入，无需申请新数组；
- 2, CS 程序初始化；
- 3, CS 程序主循环计算子程序；

- 4, 拉格朗日模块首次初始化;
- 5, 拉格朗日模块主循环子程序, 可以选择积分精度 `nordre=1 or 2`;
- 6, 拉格朗日模块计算参数输入程序。为适应 LISA 雾化模块, 需添加开关判断参数 `ilisa`;
- 7, 每个拉格朗日时间步开始时, 更新计算域内的颗粒信息;
- 8, 位于 `lagune` 循环体中。计算 LISA 模块的 We 数。首次调用时 (`ipass=1`), 根据 We 判断并选择破碎机制(长波/短波)。每次循环时, 计算特征时间, 结合 `parcel` 速度, 计算破碎距离, 并判断是否触发破碎条件。如破碎, 计算 RR 代表粒径, 并调用 `laglsrr`。
- 9, LISA 模块的用户输入设置文件;
- 10, `lagchr` 中, 如果本时间步未触发破碎条件, 则根据油膜的厚度与位移的关系更新 `parcel` 粒径属性;
- 11, 如果 `lagehr` 中判断触发微液滴破碎条件, 则根据生成 RR 随机粒径, 同时更改 `liquidCore`、包含 `particle` 数目、速度等属性;
- 12, LISA 模块初始化子程序。根据需要, 初始化油膜 `parcel` 的位置等; 本条只适用于点入射, 面入射不在此列。
- 13, 在每个拉格朗日时间步初始时刻, 执行 `sheet parcel` 喷射模块。
- 14, 将新入射 `parcel` 加入到已有 `parcel` 序列。

LISA 模型包含喷射和一次雾化破碎两个子模块:

- 1) 喷射模块的程序循环结构可参照前述 RR 喷射模块中的循环体结构, 其理论将在接下来的内容中简要介绍;
- 2) 一次雾化破碎部分将在接下来的内容中详细介绍。

3.2.2.2.1.1 一次雾化 LISA 流程图

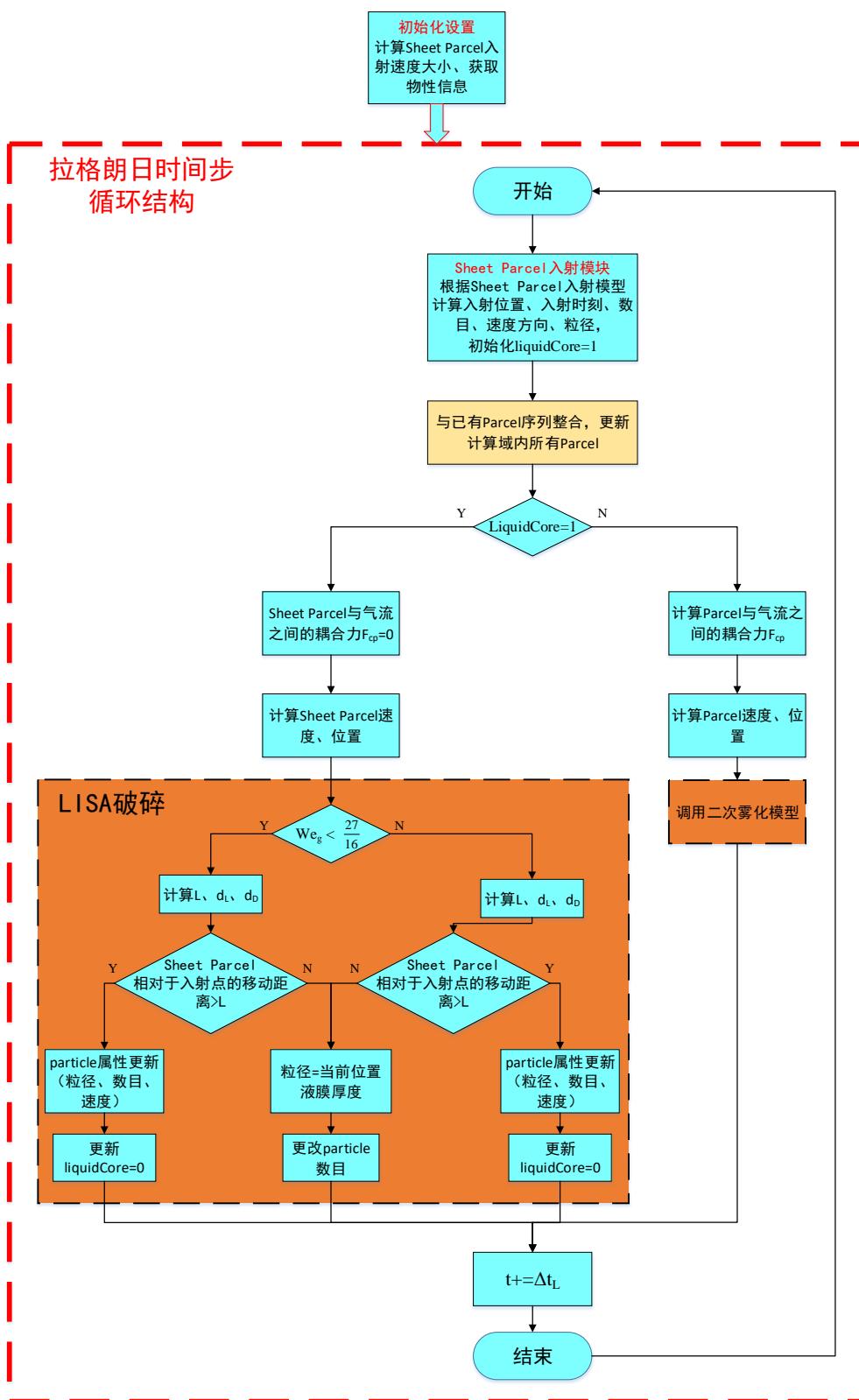


图 3-11 LISA 方法流程图

如图 3-11 所示，给出了一次雾化 LISA 模型的流程图。 Δt_L 为拉格朗日时间步，或称 Particle Time Step，在本模型中取 Code_Saturne 既有拉格朗日追踪模块得到的的 Δt_L 。 Δt_L 是对 particle 进行拉格朗日积分的时间区间长度，在 Fluent 中，该长度可由用户给出。从物理上来说， Δt_L 应该取以下特征时间的最小值：particle 的动量弛豫时间、particle 的质量弛豫时间、particle 的传热弛豫时间以及湍流涡团-particle 作用时间。从数值上来说，考虑到网格关系，particle 穿越网格的同时，其背景气相流场的信息也做了改变，这就需要在 Δt_L 时间段内对 particle 穿越网格的同时对其运动时间做切分。在 Fluent 中，时间步切分是通过 Step Length Factor 功能参数来完成的。

考虑与二次雾化的耦合，二次雾化模型将包含于图 3-11 中的“Parcel 运动模块”之中，liquidCore 属性除了在本模型中使用外，还将用于决定是否能够开启二次雾化模型。在二次雾化 KHRT 模型的开关之后，添加如下判断：如果 LISA 模型开启，那么判断 liquidcore 值为 0，则继续调用 KHRT 模型，如为 1 则不调用 KHRT 模型。

3.2.2.2 理论介绍

参数列表

\vec{a}_{cp}	耦合力引起的加速度	m s^{-2}
\vec{a}_{ncp}	非耦合力引起的加速度	m s^{-2}
C_l	液膜破碎长度修正系数	
c_τ	扰动波引起液膜破碎的阈值， $\ln(\eta_b/\eta_0)$	
\bar{D}	RR 分布代表直径	m
d_D	液滴 SMD 值	m
d_{inj}	喷嘴直径	m
d_L	液丝直径	m
d_p	液滴直径	
d_{sp}	sheet parcel 粒径	m

h	液膜厚度的一半	m
J	空心锥形雾化膜厚与运动时间的乘积, 质量守恒要求该值为常量	m s
k	波数	m^{-1}
k_v	速度系数	
K_s	最不稳定扰动波的波数	m^{-1}
L	破碎距离	m
ΔL	相对入射点的移动距离	m
liquidCore	表征液膜或液滴的参数	
M_i	每一喷点时间步长 Δt_{Li} 内注入的 parcel 质量	kg
$M_{nozz,i}$	单个喷嘴第 i 个拉格朗日时间步长内入射的 parcel 质量	kg
\dot{M}	单喷嘴喷射总质量流率	$kg\ s^{-1}$
m_{pi}	Δt_{Li} 时间步内的单个 parcel 的质量	kg
\dot{m}_{eff}	单个喷嘴出口处的液体的质量流量	$kg\ s^{-1}$
N	第 N 个喷点	
$N_{nozz,p}$	单个喷嘴在整个喷射期内喷射的 parcel 总数	
N_p	每一喷点在整个喷射期内喷射的 parcel 总数	
N_s	某喷嘴的喷点总数目	
n_{part}	parcel 内含有的 particle 数目	
n_{pi}	Δt_{Li} 时间步内 parcel 数量	
$n_{nozz,pi}$	Δt_{Li} 时间步内整个喷射面 parcel 数量	
\dot{n}_p	每一喷点单位时间注入的 parcel 数量 \dot{n}_p	s^{-1}
$\dot{n}_{nozz,p}$	单个喷嘴单位时间注入的 parcel 数量 \dot{n}_p	s^{-1}
\vec{n}_r	柱坐标径向方向单位矢量	
\vec{n}_{ref}	喷嘴参考方向	
\vec{n}_t	柱坐标切向方向单位矢量	
Oh	Ohnesorge 数	
\vec{P}_{inj}	parcel 入射位置	m

\vec{P}_{nozz}	喷嘴位置	m
\vec{P}_p	液滴/液膜当前位置	m
Δp	压差	Pa
Q	气液密度比	
q	RR 分布参数	
r	环形喷射面的某喷射点到中心的距离	m
r_1	环形喷射面内部半径	m
r_2	环形喷射面外部半径	m
r_{disp}	喷点的分散半径	m
SF	旋流比	
\vec{t}_1	垂直参考方向的某一单位向量, 在入射平面内	
\vec{t}_2	垂直参考方向的另一单位向量	
t_{end}	喷射结束时间	s
t_i	第 i 个拉格朗日时间步起始时刻	s
t_{sheet}	喷嘴出口处液膜厚度	m
t_{start}	喷射开始时间	s
Δt_L	泛指拉格朗日时间步长统称	s
Δt_{Li}	第 i 个拉格朗日时间步步长	s
\vec{U}_{cone}	parcel 的轴向速度与径向速度的合成速度	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_g	气流速度	$m\ s^{-1}$
$\vec{\bar{U}}_g$	气流平均流速	$m\ s^{-1}$
\vec{U}'_g	气体脉动速度	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_p	particle 的速度	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_r	Parcel 径向速度	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_{swirl}	parcel 旋流切向速度	$m\ s^{-1}$
U	喷嘴出口处液膜相对环境气体的运动总速度大小	$m\ s^{-1}$

U_0	液膜破碎前的速度	m s^{-1}
u	液膜轴向速度	m s^{-1}
\dot{V}	体积流率	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
We_g	气体 Weber 数	
x_{max}	particle 最大直径	m
x_{min}	particle 最小直径	m
希腊字母		
α	位置矢量与 \vec{t}_1 间的夹角	rad
η	流体质点在 y 方向上的位移	m
η_0	初始扰动幅值	m
η_b	破碎时刻的扰动幅值	m
Λ_s	最不稳定扰动波的波长	m
μ_l	液体粘度	Pa s
ν_l	液体运动粘度	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ω	圆频率复数	s^{-1}
ω_i	圆频率	s^{-1}
ω_r	增长率	s^{-1}
Ω_s	最不稳定扰动波的增长率	s^{-1}
ρ_l	液体密度	kg m^{-3}
ρ_g	气体密度	kg m^{-3}
σ	表面张力系数	N m^{-1}
τ	破碎时间	s
τ_U	动量弛豫时间	s
θ	入射方向与参考方向间的夹角	rad
θ_0	喷点入射的雾化半锥角	rad
θ_{disp}	分散角	rad
$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$	[0,1]随机数	

输入输出参数列表 checklist

操作步骤		液膜形成	液丝形成	液滴形成
输入参数	c_τ		√	
	d_{inj}	√		
	liquidCore			
	m_{pi}	√		
	$N_{nozz,p}$	√		
	N_p	√		
	N_s	√		
	\vec{P}_{nozz}	√		
	\vec{P}_p		√	
	Δp	√		
	q			√
	r_1	√		
	r_2	√		
	r_{disp}	√		
	t_{end}	√		
	t_{start}	√		
	Δt_{Li}	√	√	√
	U		√	
	\dot{V}	√		
	v_l		√	
	ρ_g		√	
	ρ_l	√	√	
	σ		√	
	θ_0	√		
	θ_{disp}	√		

	ξ_1	✓		
	ξ_2	✓		
	ξ_3	✓		
	ξ_4			✓
输出参数	d_L		✓	
	d_D			✓
	d_p			✓
	d_{sp}	✓		
	L		✓	
	liquidCore	✓		✓
	m_{pi}	✓		
	n_{part}	✓		✓
	$[n_{pi}]$	✓		
	$[n_{nozz,pi}]$	✓		
	\vec{P}_{inj}	✓		
	\vec{U}_p	✓		✓

3.2.2.2.1 液膜形成

3.2.2.2.1.1 液膜在出口处的厚度与速度

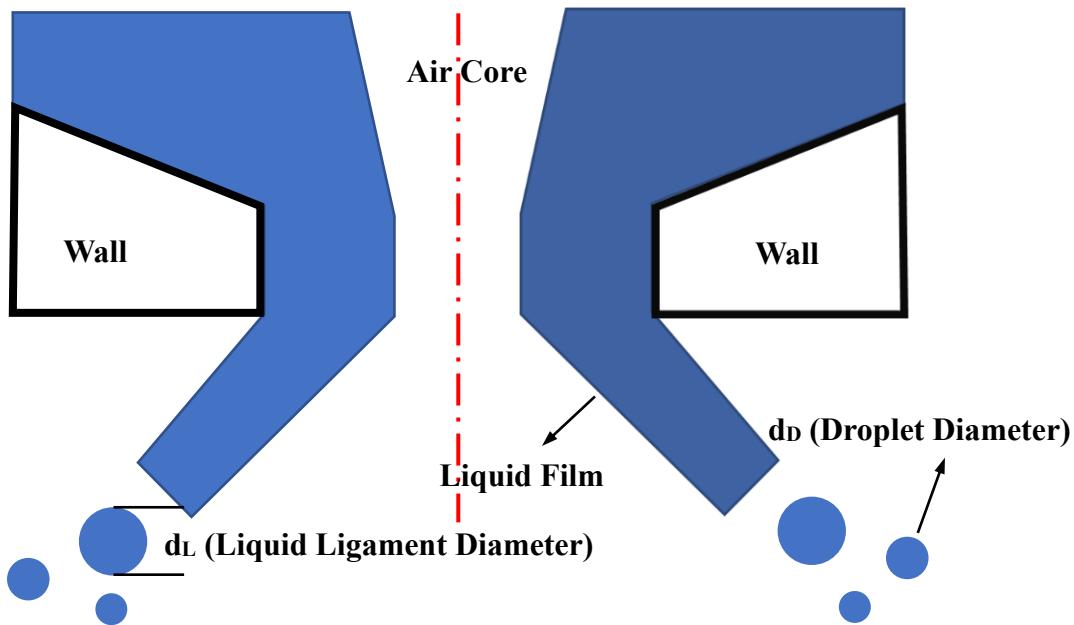


图 3-12 离心式喷嘴雾化破碎过程示意图

离心式喷嘴在出口处的液体的质量流量为

$$\dot{m}_{\text{eff}} = \pi \rho_l u t_{\text{sheet}} (d_{\text{inj}} - t_{\text{sheet}}) \quad (3.2.2.1-1)$$

上式推导过程中使用到假设 $t_{\text{sheet}} \ll d_{\text{inj}}$ 。故

$$t_{\text{sheet}} = \frac{1}{2} \left(d_{\text{inj}} - \sqrt{d_{\text{inj}}^2 - \frac{4\dot{m}_{\text{eff}}}{\pi \rho_l u}} \right) \quad (3.2.2.1-2)$$

根号下表达式的值若小于零，取绝对值。式(1)中的 u 指的是喷嘴出口处的液体的轴向速度，该轴向速度与喷嘴出口处液体的总速度 U 之间有

$$u = U \cos \theta \quad (3.2.2.1-3)$$

那么由速度方向与轴向间的夹角 θ 可知径向速度 \vec{U}_r 大小为 $U \sin \theta$ ，参考 Fluent，添加旋流切向速度 \vec{U}_t 大小同样设为 $U \sin \theta$ 。我们将在程序中设置开关是

否带有旋流。总速度 U 可由下式得到

$$U = k_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_l}} \quad (3.2.2.2.1-4)$$

其中速度系数 k_v 可以由下式得到

$$k_v = \max \left[0.7, \frac{4\dot{m}_{\text{eff}}}{\pi d_{\text{inj}}^2 \rho_l \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho_l}{2\Delta p}} \right] \quad (3.2.2.2.1-5)$$

以上 \dot{m}_{eff} 为已知量，而最终可以求解得到 U 、 u 以及 t_{sheet} 。同时，还可计算液体的体积流率

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{\text{eff}}}{\rho_l} \quad (3.2.2.2.1-6)$$

3.2.2.2.2.1.2 液膜 sheet parcel 的数量、质量与入射位置、时刻

液膜在计算模块中采用离散相 `parcel` 表示，在既有的 `particle` 属性中新增 `liquidCore` 参数。

$$\text{liquidCore} = \begin{cases} 0 & \text{液滴} \\ 1 & \text{液膜} \end{cases} \quad (3.2.2.2.1-7)$$

`liquidCore` 为 1 表示该 `parcel` 表征的是液膜，方便与液滴颗粒的 `parcel` 进行区分，不妨称为 `sheet parcel`。

液膜的入射方位等处理同上文 RR 喷射模型，同样有点入射与面入射两种方式。

3.2.2.2.2.1.2.1 喷点入射

首先需要在初始化阶段确定各喷点的位置。如图 3-6 所示，给出锥形入射的几何， \vec{n}_{ref} ， \vec{t}_1 ， \vec{t}_2 组成了直角坐标系。图 3-6 还给出了另一组柱坐标系 \vec{n}_{ref} ， \vec{n}_r ， \vec{n}_t ，分别指轴向、径向与切向。 α 为径向 \vec{n}_r 与 \vec{t}_1 夹角。

径向方向 \vec{n}_r 由坐标轴 \vec{t}_1, \vec{t}_2 以及夹角 α 给定,

$$\vec{n}_r = \cos \alpha \vec{t}_1 + \sin \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.2.1-8)$$

而切向方向为

$$\vec{n}_t = -\sin \alpha \vec{t}_1 + \cos \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.2.1-9)$$

对于第 N 个喷点, 不妨取

$$\alpha = \frac{2\pi}{N_s} (N - 1) \quad (3.2.2.2.1-10)$$

上式中 N_s 为喷点总数。

$$\vec{P}_{inj} = \vec{P}_{nozz} + r_{disp} \vec{n}_r \quad (3.2.2.2.1-11)$$

那么, 上式就给定了离心式喷嘴 N_s 个喷点的位置。

其次确定在一个拉格朗日时间步长 Δt_L 内, 单个喷点中的入射 sheet parcel 的质量与数量。通过质量流率容易计算得到第 i 个拉格朗日时间步长 Δt_{Li} 注入到单个喷点中的 sheet parcel 质量 M_i 。

$$M_i = \frac{1}{N_s} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{M} dt = \frac{1}{N_s} \dot{M} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.2.1-12)$$

此处有

$$\dot{M} = \dot{m}_{eff} \quad (3.2.2.2.1-13)$$

单个喷点单位时间注入 sheet parcel 数量 \dot{n}_p

$$\dot{n}_p = \frac{N_p}{t_{end} - t_{start}} \quad (3.2.2.2.1-14)$$

单个喷点在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内注入的 sheet parcel 数量

$$n_{pi} = \dot{n}_p \Delta t_{Li} = \frac{N_p}{t_{end} - t_{start}} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.2.1-15)$$

考虑到 n_{pi} 的取整微调操作, 上式还需要做进一步修正。将 n_{pi} 做四舍五入, 得到单个喷点在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内注入的 sheet parcel 数量

$$[n_{pi}] \equiv \text{int}(n_{pi} + 0.49) \quad (3.2.2.1-16)$$

而该拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内单个 sheet parcel 的质量为

$$m_{pi} = \frac{M_i}{[n_{pi}]} \quad (3.2.2.1-17)$$

于是，在当前拉格朗日时间步起始时刻 t_i 在该喷点同时入射 $[n_{pi}]$ 个 sheet parcel。入射位置前述已得为

$$\vec{P}_{inj} = \vec{P}_{nozz} + r_{disp} \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-18)$$

3.2.2.2.1.2.2 面入射

同样先确定在一个拉格朗日时间步长 Δt_L 内，该喷嘴由面上入射到计算域内的 sheet parcel 的质量与数量。通过质量流率容易计算得到第*i*个拉格朗日时间步长 Δt_{Li} 注入的 sheet parcel 质量 $M_{nozz,i}$ 。

$$M_{nozz,i} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{M} dt = \dot{M} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.1-19)$$

单位时间通过该喷嘴注入的 sheet parcel 数量 $\dot{n}_{nozz,p}$

$$\dot{n}_{nozz,p} = \frac{N_{nozz,p}}{t_{end} - t_{start}} \quad (3.2.2.1-20)$$

那么拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内通过该喷嘴注入的 sheet parcel 数量

$$n_{nozz,pi} = \dot{n}_p \Delta t_{Li} = \frac{N_{nozz,p}}{t_{end} - t_{start}} \Delta t_{Li} \quad (3.2.2.1-21)$$

将 $n_{nozz,pi}$ 做四舍五入，得到该喷嘴在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内注入的 sheet parcel 数量

$$[n_{nozz,pi}] \equiv \text{int}(n_{pi} + 0.49) \quad (3.2.2.1-22)$$

而该拉格朗日时间步内单个 parcel 的质量为

$$m_{pi} = \frac{M_{nozz,i}}{[n_{pi}]} \quad (3.2.2.1-23)$$

于是，在当前拉格朗日时间步起始时刻 t_i 在面上同时入射 $[n_{nozz,pi}]$ 个 sheet parcel。接下来需要确定面上的具体的入射位置。

按照前文中 RR 喷射面入射的方式，构造出垂直于参考方向 \vec{n}_{ref} 的坐标轴 \vec{t}_1 与 \vec{t}_2 来，这样 \vec{n}_{ref} 、 \vec{t}_1 与 \vec{t}_2 构成直角坐标系。入射点位置的确定涉及两方面的随机性，一是周向方向 (\vec{P}_{inj} 与坐标轴 \vec{t}_1 的夹角 α 的随机性)，二是径向距离 r 。

$$\alpha = 2\pi\xi_1 \quad (3.2.2.1-24)$$

而径向距离

$$r = r_1 + \xi_2(r_2 - r_1) \quad (3.2.2.1-25)$$

其中，

$$r_1 = r_{disp} \frac{\tan\left(\theta_0 - \frac{1}{2}\theta_{disp}\right)}{\tan\theta_0} \quad (3.2.2.1-26)$$

$$r_2 = r_{disp} \frac{\tan\left(\theta_0 + \frac{1}{2}\theta_{disp}\right)}{\tan\theta_0} \quad (3.2.2.1-27)$$

由此，我们得到入射点的位置是

$$\vec{P}_{inj} = \vec{P}_{nozz} + r \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-28)$$

式中，

$$\vec{n}_r = \cos\alpha \vec{t}_1 + \sin\alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.1-29)$$

3.2.2.2.1.3 液膜在出口处的速度方向

3.2.2.2.1.3.1 喷点入射

考虑每个喷点的雾化半锥角 θ_0 与分散角 θ_{disp} , 可得到一随机的入射方向

$$\theta = \theta_0 + \left(\xi_3 - \frac{1}{2} \right) \theta_{disp} \quad (3.2.2.1-30)$$

那么, 入射的 sheet parcel 的速度为

$$\vec{U}_p = U_{cone} \vec{n}_{cone} + \text{sign}(SF) U_{swirl} \vec{n}_t \quad (3.2.2.1-31)$$

其中, 旋流切向速度 \vec{U}_{swirl} 参考 Fluent (另外我们将在程序中设置开关是否带有旋流):

$$U_{swirl} = U \sin \theta \quad (3.2.2.1-32)$$

$$U_{cone} = U \quad (3.2.2.1-33)$$

$$\vec{n}_{cone} = \cos \theta \vec{n}_{ref} + \sin \theta \vec{n}_r \quad (3.2.2.1-34)$$

径向方向 \vec{n}_r 由坐标轴 \vec{t}_1, \vec{t}_2 以及夹角 α 给定,

$$\vec{n}_r = \cos \alpha \vec{t}_1 + \sin \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.1-35)$$

而切向方向为

$$\vec{n}_t = -\sin \alpha \vec{t}_1 + \cos \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.1-36)$$

对于第 N 个喷点, 不妨取

$$\alpha = \frac{2\pi}{N_s} (N - 1) \quad (3.2.2.1-37)$$

上式中 N_s 为喷点总数。

3.2.2.2.1.3.2 面入射

面入射的入射方向 θ , 有

$$\tan \theta = \frac{r}{r_{disp}} \tan \theta_0 \quad (3.2.2.1-38)$$

考虑旋流之后, sheet parcel 的速度为

$$\vec{U}_p = U_{cone} \vec{n}_{cone} + \text{sign}(SF) U_{swirl} \vec{n}_t \quad (3.2.2.1-39)$$

其中 U_{swirl} 与 U_{cone} 同式(32)(33), 其他变量参考式(19)(27)(28)(29)(30)(31)。

3.2.2.2.1.4 Sheet parcel 的颗粒粒径与所含 particle 数目

对于单个 sheet parcel 的颗粒粒径 d_{sp} 可取一个不大于液膜厚度的参考值, 这里令其

$$d_{sp} = t_{sheet} \quad (3.2.2.1-40)$$

进而得到 sheet parcel 中的 particle 数目

$$n_{part} = \frac{m_{pi}}{\rho_l \frac{1}{6} \pi d_{sp}^3} \quad (3.2.2.1-41)$$

3.2.2.2.1.5 液膜 Sheet Parcel 的运动计算

Particle 在流场中受到多种力的不同作用, 如下式,

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = F_d + F_p + F_{vm} + F_l + F_g + F_{mag} + F_{SRF} \quad (3.2.2.2-1)$$

上式等式右边分别表示曳力、压力、附加质量力、升力、重力、电磁力、同步参考坐标变换作用力。其中第 1-4 项表示的是 particle-流体之间的相互作用 (耦合力), 而第 5-7 项表示的是 particle 的其他作用力 (非耦合力)。为简单记, 只考虑曳力与重力, 则上式可以写作

$$\frac{d}{dt} \vec{U}_p = -\frac{\vec{U}_p - (\vec{U}_g + \vec{U}'_g)}{\tau_U} + \vec{g} \quad (3.2.2.2.2-2)$$

以上为拉格朗日颗粒的一般运动方程形式， \vec{U}_p 为颗粒速度， \vec{U}_g 是气流在 particle 位置处的平均速度， \vec{U}'_g 为气流的湍流速度扰动。在 particle 位置处的流体速度

$$\vec{U}_g = \vec{U}_g + \vec{U}'_g \quad (3.2.2.2.2-3)$$

τ_U 为气液动量交换的弛豫时间 (momentum relaxation time)， \vec{g} 为重力加速度。如果气液间相互作用力是曳力，且 particle 假定为球形，那么有

$$\tau_U = \frac{4}{3} \frac{\rho_l d_D}{\rho_g C_D |\vec{U}_p - \vec{U}_g|} \quad (3.2.2.2.2-4)$$

联立式(2)(3)，得到经过一个拉格朗日时间步 Δt_L 后的 particle 速度

$$\vec{U}_p(t_0 + \Delta t_L) = \vec{U}_p(t_0) - \frac{\Delta t_L}{1 + \Delta t_L/\tau_U} \frac{\vec{U}_p(t_0)}{\tau_U} + \frac{\Delta t_L}{1 + \Delta t_L/\tau_U} (\vec{a}_{cp} + \vec{a}_{ncp}) \quad (3.2.2.2.2-5)$$

在这里，

$$\vec{a}_{cp} = \vec{U}_g(t_0)/\tau_U \quad (3.2.2.2.2-6)$$

表示气液间曳力对 particle 的加速度（耦合力加速度），而

$$\vec{a}_{ncp} = \vec{g} \quad (3.2.2.2.2-7)$$

为重力场对 particle 的加速度（非耦合力加速度）。

在 LISA 模型中，忽略液膜 (i.e. sheet parcel) 与气流间的相互作用。数值上采用 particle 运动方程来描述液膜的运动时，即 1) LISA 模型开关开启且 2) liquidCore=1 同时满足时（不同于 WAVE 模型），有 $\tau_U \rightarrow \infty$ 。

综上，sheet parcel 速度的时间递进关系式由(5)给出，只需要在现有的拉格朗日追踪模块的基础上令 $\tau_U \rightarrow \infty$ ， $\vec{a}_{cp} = 0$ 。而位置的时间递进关系式由下式给出

$$\vec{P}_p(t_0 + \Delta t_L) = \vec{P}_p(t_0) + \vec{U}_p(t_0) \Delta t_L \quad (3.2.2.2.2-8)$$

3.2.2.2.2 液丝形成

考虑一有粘性、不可压的 2D 液膜，其厚度为 $2h$ ，在周围无粘、不可压的静止气体中以速度 U 运动。在液膜运动参考系内，考虑一施加在液膜表面的小扰动波，

$$\eta = Re[\eta_0 \exp(ikx + \omega t)] \quad (3.2.2.2.3-1)$$

其中， η 表示流体质点在 y 方向上的位移。 η_0 表示初始扰动幅值。 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数， $\omega = \omega_r + i\omega_i$ 表示增长率（复数）。最不稳定的扰动波具有最大的 ω_r ，这里记作 Ω_s 。LISA 模型认为，最不稳定扰动波的幅值的增长直接导致液膜的破碎。而对应于 Ω_s 的最不稳定波的波长为 $\Lambda_s = 2\pi/K_s$ ，这里的 K_s 通过色散关系求得（已知 Ω_s 的条件下）。

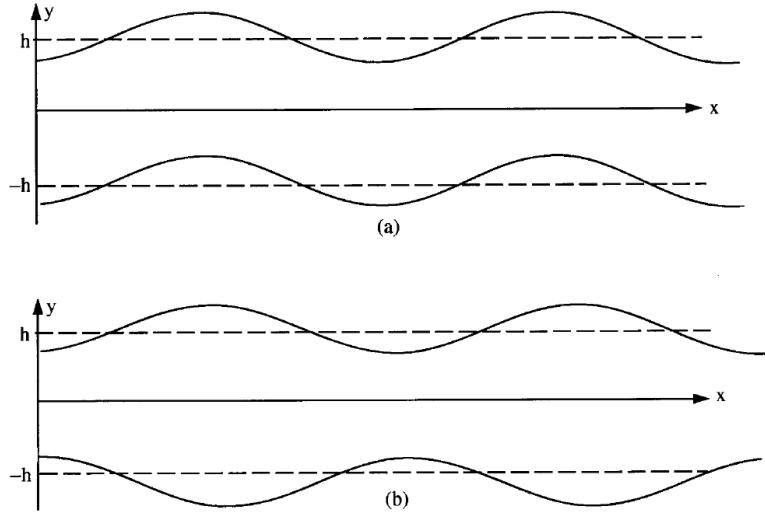


图 3-13 两种形式的扰动波：
 (a) sinuous(反对称)扰动波；(b) varicose(对称)扰动波

很显然，

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \omega \eta \quad (3.2.2.2.3-2)$$

这里的根本问题是色散关系。Senecal(1999)指出，对于液膜来说，在气液密度比 $Q = \frac{\rho_g}{\rho_l} \ll 1$ 的情况下，sinuous(反对称)扰动波的最大增长率 Ω_s 一定大于

varicose(对称)扰动波的最大增长率。所以只需要讨论 sinuous 扰动波的情况。

考虑液体粘性，液膜的 sinuous 扰动波的色散关系

$$\omega_r = -\frac{2\nu_1 k^2 \tanh(kh)}{\tanh(kh) + Q} + \frac{\sqrt{4\nu_1^2 k^4 \tanh^2(kh) - Q^2 U^2 k^2 - [\tanh(kh) + Q](-QU^2 k^2 + \sigma k^3 / \rho_1)}}{\tanh(kh) + Q} \quad (3.2.2.2.3-3)$$

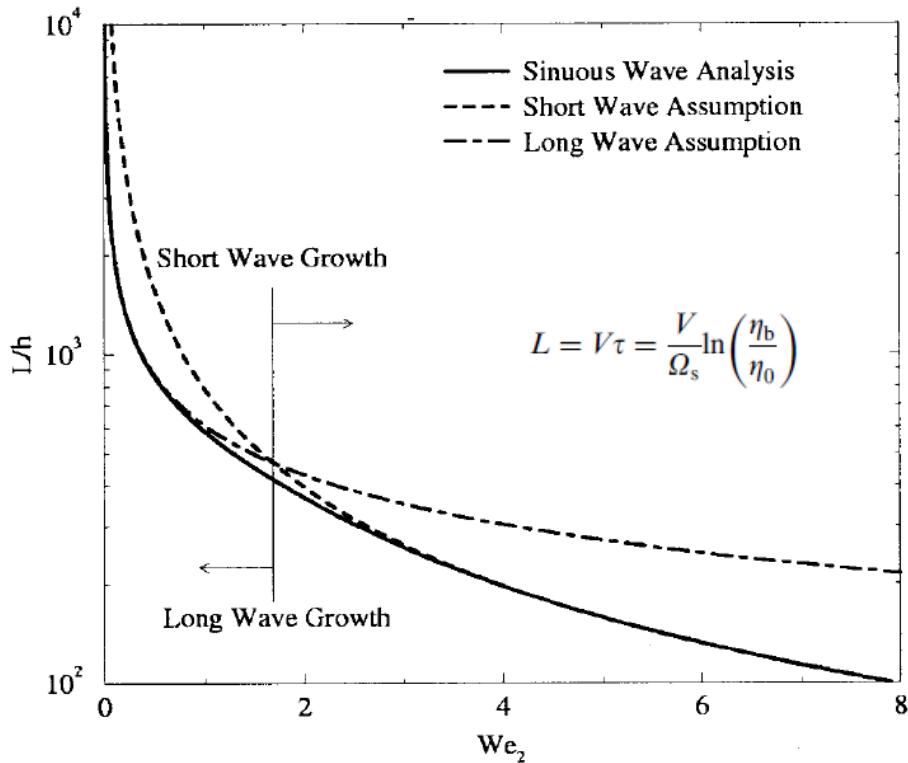


图 3-14 无粘条件下的无量纲破碎长度与气体 We 数的关系：sinuous 波、短波条件、长波条件

如图 3-14 所示，比较了无粘条件下的 sinuous 波的无量纲破碎长度、长波近似下的无量纲长度、短波近似下的无量纲长度。在 $We_g < 27/16$ 时认为 sinuous 波的破碎长度可以用长波近似得到；而 $We_g > 27/16$ 时，认为 sinuous 波的破碎长度可以用短波近似得到。

在每个 Δt_L 内，首先确定液膜相对入射点的移动距离

$$\Delta L = |\vec{P}_p - \vec{P}_{inj}| \quad (3.2.2.2.3-4)$$

3.2.2.2.2.1 长波情况

该条件下满足 $We_g < 27/16$ ($We_g = \rho_g U^2 h / \sigma$)。采用长波近似，即

$$\checkmark Q \ll kh; \text{ (Squire 1953)}$$

$$\checkmark \tanh kh \approx kh; \text{ (Hagerty and Shea (1955) and Squire (1953),)}$$

略去小量，色散关系简化为

$$\omega_r = -2\nu_l k^2 + \sqrt{4\nu_l^2 k^4 + \frac{Q U^2 k}{h} - \frac{\sigma k^2}{\rho_l h}} \quad (3.2.2.2.3-5)$$

其最不稳定扰动波的波数 K_s 有

$$K_s = \frac{\rho_g U^2}{2\sigma} \quad (3.2.2.2.3-6)$$

式(5)(6)联立可得 Ω_s 。

注意到式(5)中，增长率 ω_r 与 h 有关。在空心锥形雾化中，液膜厚度随着轴向距离的变化而变化，也即 h 是时间 t 的函数。因此，增长率是 t 的函数，由(2)式得到 $[0, t]$ 时间段内扰动幅值有如下关系

$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) = \int_0^t \omega dt' \quad (3.2.2.2.3-7)$$

Senecal(1999)指出，在长波扰动下，可以忽略液体的粘性，通过代入无粘条件下的色散关系

$$\omega_r = \sqrt{\frac{Q U^2 k^2 - \sigma k^3 / \rho_l}{kh}} \quad (3.2.2.2.3-8)$$

可以得到破碎时间

$$\tau = \left[3 \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right) \right]^{\frac{2}{3}} \left(\frac{J\sigma}{Q^2 U^4 \rho_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2.2.2.3-9)$$

上式中 $J = ht$ 是常量。一般由用户设定扰动波引起液膜破碎的阈值 c_τ

$$c_\tau = \ln(\eta_b/\eta_0) \quad (3.2.2.2.3-10)$$

默认 $c_\tau = 12$ 。进而可以求得破碎长度

$$L = U\tau \quad (3.2.2.2.3-11)$$

在 OpenFOAM v7 中，采用修正系数 C_l 对破碎长度进行修正。

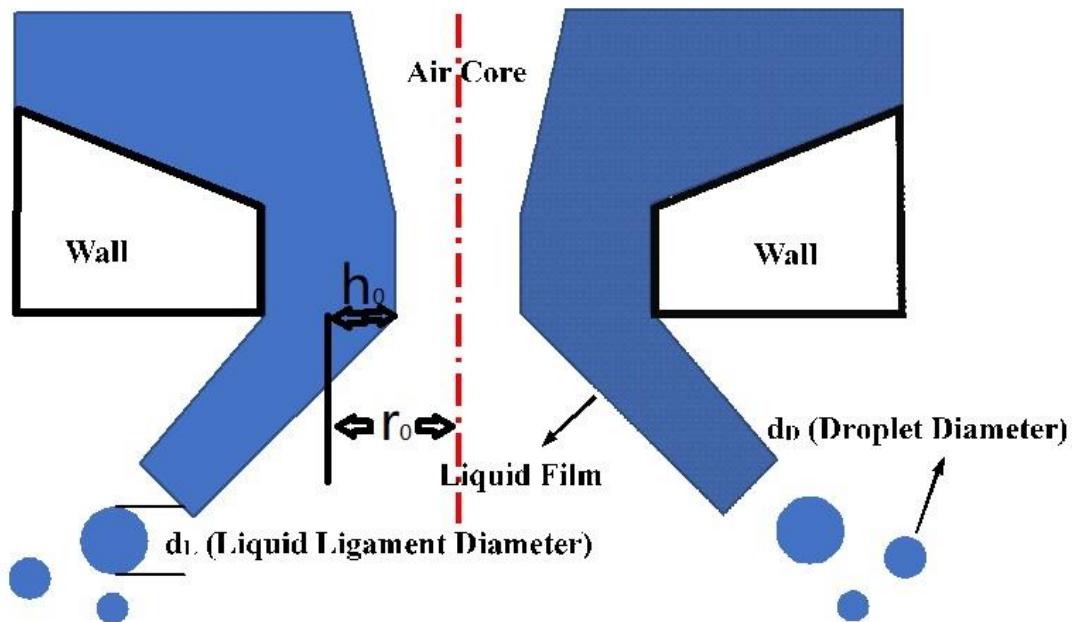
在长波条件下，破碎时液丝的直径

$$d_L = \sqrt{\frac{8h}{K_s}} \quad (3.2.2.2.3-12)$$

注意，上述表达式中 h 为发生破碎处液膜的半厚度，参考 Fluent，其计算表达式为

$$h = \frac{\frac{1}{4}(d_{inj} - t_{sheet})t_{sheet}}{\frac{1}{2}(d_{inj} - t_{sheet}) + \Delta L \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (3.2.2.2.3-13)$$

备注：Fluent 理论手册中 L_b 确实应采用本文中的 ΔL 更为合理，而 h_0 及 r_0 的定义补充如下图标注：



3.2.2.2.2.2 短波情况

该条件下满足 $We_g > 27/16$ 。采用短波近似，即

- ✓ $\tanh(kh) = \coth(kh) = 1$
- ✓ $Q \ll 1$

得到，

$$\omega_r = -2\nu_l k^2 + \sqrt{4\nu_l^2 k^4 + QU^2 k^2 - \frac{\sigma k^3}{\rho_l}} \quad (3.2.2.2.3-14)$$

通过对上式求极值，可得 K_s 与 Ω_s 。

备注：

首先因为 $\omega_r > 0$ ，所以 k 的定义域为 $[0, \frac{QU^2\rho_l}{\sigma}]$ ；且

$$\omega'_r(k) = \frac{\left(8\nu_l^2 k^3 + QU^2 k - \frac{3\sigma}{2\rho_l} k^2\right)}{\left(4\nu_l^2 k^4 + QU^2 k^2 - \frac{\sigma k^3}{\rho_l}\right)^{1/2}} - 4\nu_l k \quad (3.2.2.2.3-15)$$

很显然的有

$$\omega'_r(k_{Pos,0}) = \sqrt{QU^2} \quad (3.2.2.2.3-16)$$

$$\omega'_r(k_{Neg,0}) = \frac{\left(8\nu_l^2 k_{Neg,0}^3 + QU^2 k_{Neg,0} - \frac{3\sigma}{2\rho_l} k_{Neg,0}^2\right)}{\left(4\nu_l^2 k_{Neg,0}^4 + QU^2 k_{Neg,0}^2 - \frac{\sigma k_{Neg,0}^3}{\rho_l}\right)^{1/2}} \quad (3.2.2.2.3-17)$$

$$- 4\nu_l k_{Neg,0}$$

这里 $k_{Pos,0} = 0$, $k_{Neg,0} = \frac{QU^2\rho_l}{\sigma}$ 。可以看到， $\omega'_r(k_{Pos,0}) > 0$, $\omega'_r(k_{Neg,0}) < 0$ ，说明区间 $[k_{Pos,0}, k_{Neg,0}]$ 内存在极值。

在区间 $[k_{Pos,0}, k_{Neg,0}]$ 上生成一个新的试探解

$$k_1 = k_{Pos,0} - \frac{\omega'_r(k_{Pos,0})}{\omega'_r(k_{Neg,0}) - \omega'_r(k_{Pos,0})} (k_{Neg,0} - k_{Pos,0}) \quad (3.2.2.2.3-18)$$

上式中，因为 $\omega'_r(k_{Pos,0}) > 0, \omega'_r(k_{Neg,0}) < 0$ ，故右侧系数满足：

$$0 < -\frac{\omega'_r(k_{Pos,0})}{\omega'_r(k_{Neg,0}) - \omega'_r(k_{Pos,0})} < 1$$

于是 $k_{Pos,0} < k_1 < k_{Neg,0}$ 。如果 $\omega'_r(k_1) > 0$ ，那就说明极值在区间 $[k_1, k_{Neg,0}]$ 中；反之 $\omega'_r(k_1) < 0$ ，说明极值在区间 $[k_{Pos,0}, k_1]$ 中。这样反复迭代，不断收缩区间 $[k_{Pos,n}, k_{Neg,n}]$ ，就能求得极值对应的 k 。

假设当扰动波到达一定幅值 η_b 时，液膜破碎，破碎时间为 τ ，

$$\tau = \frac{1}{\Omega_s} \ln \left(\frac{\eta_b}{\eta_0} \right) \quad (3.2.2.2.3-19)$$

默认当 $c_\tau = \ln(\eta_b/\eta_0) = 12$ 引发破碎。但是刘日超等的工作指出，该值在某些情况下取值 1 得到的计算结果与试验结果符合较好。

在此期间，液膜向前运动了（即破碎长度）

$$L = \frac{U}{\Omega_s} \ln \left(\frac{\eta_b}{\eta_0} \right) \quad (3.2.2.2.3-20)$$

在 OpenFOAM v7 中，采用修正系数 C_l 对破碎长度进行修正。

破碎的时候，其液丝直径为

$$d_L = \sqrt{\frac{16h}{K_s}} \quad (3.2.2.2.3-21)$$

注意以上 h 为破碎发生处膜厚的一半，其计算表达式为

$$h = \frac{\frac{1}{4}(d_{inj} - t_{sheet})t_{sheet}}{\frac{1}{2}(d_{inj} - t_{sheet}) + \Delta L \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (3.2.2.3-22)$$

3.2.2.2.2.3 液滴形成

3.2.2.2.2.3.1 液滴 Parcel 中颗粒的粒径

以上，分长波、短波两种情况计算得到了破碎长度以及破碎形成的液丝的直径。破碎长度用来判断液膜是否要破碎形成颗粒。有了液丝的直径就可以计算液滴的直径。通过计算圆柱形状的粘性液丝在表面张力的作用下，产生 Plateau-Rayleigh 不稳定性，其破碎形成的液滴大小为

$$d_D = 1.88d_L(1 + 3Oh)^{1/6} \quad (3.2.2.3-23)$$

这里 Ohnesorge 数

$$Oh = \frac{\mu_l}{(\rho_l \sigma d_L)^{1/2}} \quad (3.2.2.3-24)$$

以上得到的 d_D 为索特平均直径。实际上，破碎液滴的直径服从 RR 分布，那么有

$$d_p = \bar{D} \left[\left(\frac{x_{min}}{\bar{D}} \right)^q - \ln(1 - K\xi_4) \right]^{1/q} \quad (3.2.2.3-25)$$

其中，

$$K = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_{max}}{\bar{D}} \right)^q + \left(\frac{x_{min}}{\bar{D}} \right)^q \right] \quad (3.2.2.3-26)$$

平均代表直径 $\bar{D} = d_D$ ，分布参数 $q = 3$ ， $x_{min} = d_D/10$ ， $x_{max} = d_D$ 。此次的处理方式参照 OF，无文献出处。

3.2.2.2.2.3.2 液滴 Parcel 中颗粒数量

破碎后 parcel 内含的 particle 数目

$$n_{part} = \frac{m_{pi}}{\rho_l \frac{1}{6} \pi d_p^3} \quad (3.2.2.3-27)$$

3.2.2.2.3.3 液滴速度

破碎后的 particle 速度与未触发破碎事件之前的 parcel 的实时速度相等， 方向不变：

$$\vec{U}_p = \vec{U}_p(t) \quad (3.2.2.3-28)$$

3.2.2.2.3.4 liquidCore 标记更新

破碎后，Sheet Parcel 转变为真实液滴 Parcel，破碎后的 liquidCore 属性，该属性除了在本模型中使用外，还将用于决定是否能够开启二次雾化模型，在二次雾化 KHRT 模型的开关之后，添加如下判断：如果 LISA 模型开启，那么判断 liquidCore 值为 0，则继续调用 KHRT 模型，如为 1 则不调用 KHRT 模型。

$$\text{liquidCore} = 0 \quad (3.2.2.3-29)$$

3.2.2.3 参考文献

- [1] Senecal P K , Schmidt D P , Nouar I , et al. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6-7):1073-1097.
- [2] Schmidt D P, Nouar I, Senecal P K, et al. Pressure-Swirl Atomization in the Near Field. SAE transactions, 1999, 108(1416): 105-118.
- [3] Nordin, P. A., Complex chemistry modeling of diesel spray combustion, PhD thesis, 2001

3.2.2.3 直喷式雾化 WAVE 模型开发集成

3.2.2.3.1 技术路线图

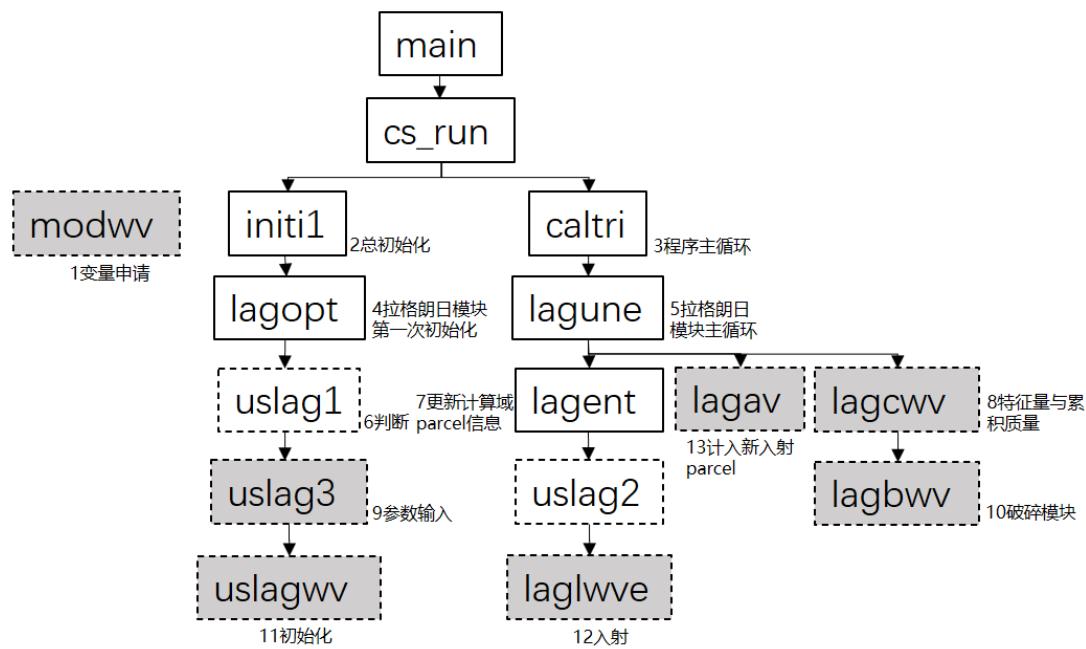


图 3-15 一次雾化 WAVE 模型模块设计图

- ✓ 白色实线框表示 CS 既有子程序，无需修改；
- ✓ 白色虚线框表示 CS 既有子程序，但需要根据 RR 点喷射模块做适应性修改，比如增加开关参数；
- ✓ 灰色虚线框为开发者添加子程序。

以下是逻辑流程图的具体说明：

1, WAVE 雾化模型相关变量声明；

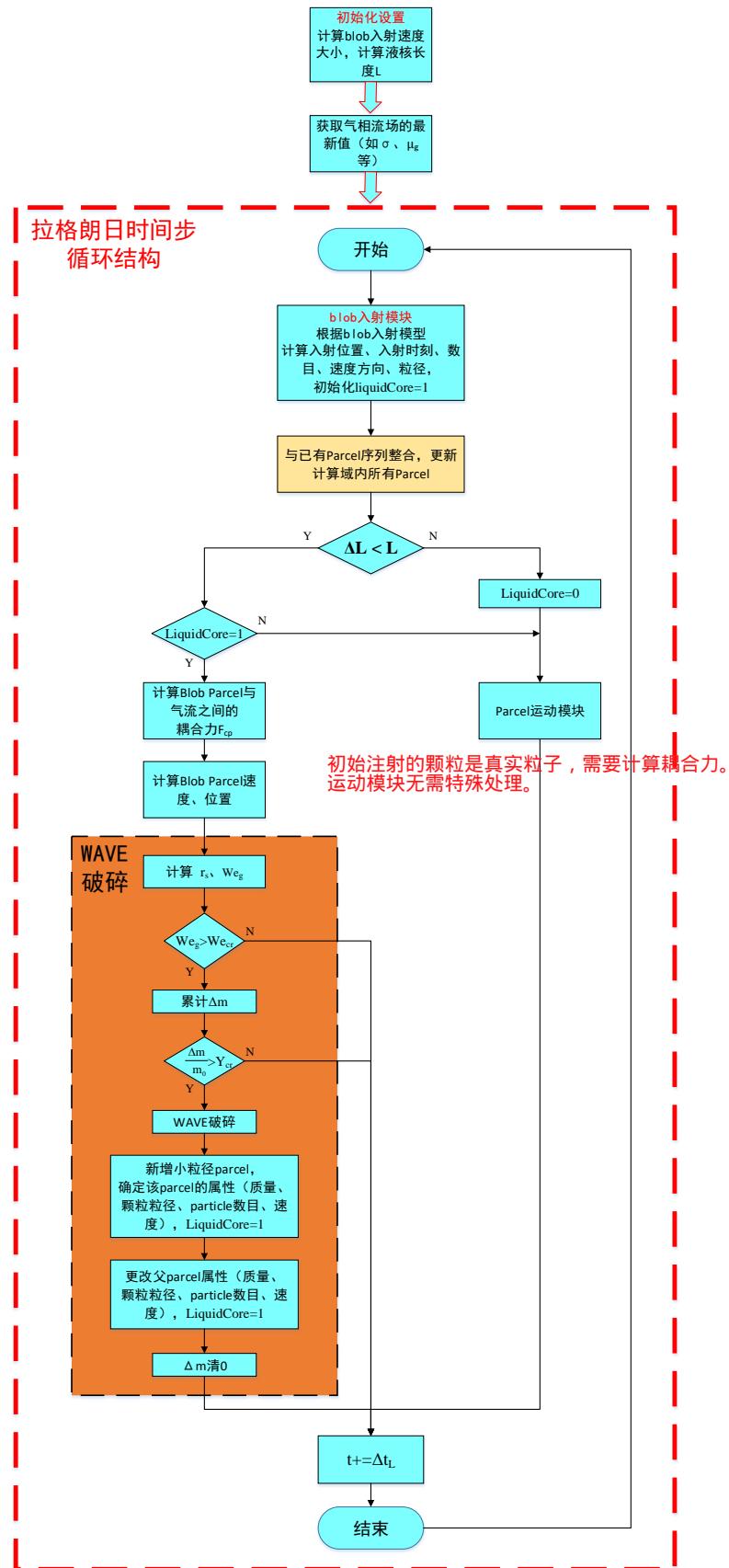
2, CS 程序初始化；

3, CS 程序主循环计算子程序；

4, 拉格朗日模块首次初始化；

- 5, 拉格朗日模块主循环子程序, 可以选择积分精度 `nordre=1 or 2`;
- 6, 拉格朗日模块计算参数输入程序。为适应 WAVE 雾化模块, 需添加开关判断参数 `iwave`;
- 7, 每个拉格朗日时间步开始时, 更新计算域内的颗粒信息;
- 8, 位于 `lagune` 循环体中。**计算特征量与累积脱离质量**, 如累积脱离质量大于用户输入临界值, 则触发 WAVE 破碎模式。
- 9, WAVE 模块的用户输入设置文件;
- 10, WAVE 破碎模块, **更新父 parcel 和子 parcel 的属性**。其中子 `parcel` 的粒径由不稳定波长计算得到, 而父 `parcel` 的数目属性保持不变;
- 11, WAVE 模型用户初始化, 给定直喷喷嘴位置;
- 12, WAVE 模块初始化子程序。**采用 Blob 喷射方法**。
- 13, 处理本拉格朗日时间步新入射 `parcel`, **将新入 Parcel 加入到已有 Parcel 序列**中, **更新计算域内所有 parcel 信息属性数组**。

3.2.2.3.1.1 流程图



考虑与二次雾化的耦合，二次雾化模型将包含于上图中的“Parcel 运动模块”之中，liquidCore 属性除了在本模型中使用外，还将用于决定是否能够开启二次雾化模型，在二次雾化 KHRT 模型的开关之后，添加如下判断：如果 WAVE 模型开启，那么判断 liquidCore 值为 0，则继续调用 KHRT 模型，如为 1 则不调用 KHRT 模型。

3.2.2.3.2 理论介绍

参数列表

A	喷嘴出口面积	m^2
c_1	常数	
C_d	派遣系数(coefficient of discharge)	
d_0	喷嘴出口直径	m
d_p	射流喷入尺寸	m
M_i	拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内某喷嘴入射的所有 parcel 的质量	kg
\dot{M}	某喷嘴喷射的液体的质量流量	kg s^{-1}
m_0	未发生二次破碎事件前的 parcel 质量	kg
m_b	破碎后大粒径子 parcel 的质量	kg
m_s	破碎后小粒径子 parcel 的质量	kg
m_{pi}	拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内该喷点入射的单个 parcel 的质量	kg
Δm	累计脱落质量	kg
\dot{m}	某喷嘴的质量流量	kg s^{-1}
N_p	单个喷点入射的 parcel 总数	
n_b	破碎后的粒径较大的 parcel 包含的 particle 数	
n_p	父 parcel 包含的 particle 数	
n_{pi}	单个喷点在拉格朗日时间步 Δt_{Li} 内入射的 parcel 数量	
n_s	破碎后的粒径较小的 parcel 包含的 particle 数	
\dot{n}_p	单个喷点单位时间入射的 parcel 数量	s^{-1}
\vec{n}_p	Blob 速度方向单位矢量	

\vec{n}_r	径向单位矢量	
\vec{n}_{ref}	喷射轴向	
Oh	Ohnesorge 数	
Re	Reynolds 数	
r_b	破碎后的较大的子 particle 的半径	m
r_p	破碎发生前的 particle 半径	m
r_s	破碎后的较小子 particle 半径	m
Ta	Taylor 数	
\vec{P}_{nozz}	喷嘴位置	m
Δp	压差	Pa
t_{end}	喷射结束时间	s
t_{Li}	第 i 个拉格朗日时间步起始时刻	s
t_{start}	喷射开始时间	s
Δt_{Li}	第 i 个拉格朗日时间步步长	s
\vec{t}_1	垂直于 \vec{n}_{ref} 的单位向量	
\vec{t}_2	单位向量，与 \vec{n}_{ref} 、 \vec{t}_1 组成直角坐标系	
U_r	气液速度差	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_b	破碎后的较大子 particle 速度	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_p	父 particle 速度	$m\ s^{-1}$
\vec{U}_s	破碎后的较小子 particle 速度	$m\ s^{-1}$
ΔU_{\perp}	破碎分离垂直速度	$m\ s^{-1}$
We	Weber 数	
We _{cr}	剥离破碎临界 We 数	
Y_{cr}	累计脱离质量分数临界值	
希腊字母		
α	柱坐标径向 \vec{n}_r 与 \vec{t}_1 夹角	rad

Λ_{KH}	最不稳定扰动波的波长	m
μ_l	液体粘度	Pa s
Ω_{KH}	扰动波的最大增长率	s ⁻¹
ρ_g	气体密度	kg m ⁻³
ρ_l	液体密度	kg m ⁻³
σ	表面张力	N m ⁻¹
τ_{KH}	破碎特征时间	s
θ	射流方向与轴向间的夹角	rad
θ_0	雾化半锥角	rad
ξ_1, ξ_2, ξ_3	随机数	

输入输出参数 checklist

操作步骤		入射位 置	Parcel 的数 量、质 量与入 射时刻	Parcel 的粒径	Parcel 的速度 大小与 方向	Blobs 的 速度计 算	WAVE 破碎模 型
输入 参数	\vec{a}_{ncp}					✓	
	C_a			✓			
	C_d				✓		
	d_0			✓			
	\dot{M}		✓				
	N_p		✓				
	\vec{n}_{ref}				✓		
	\vec{P}_{nozz}	✓					
	Δp				✓		
	t_{end}		✓				
	t_{Li}		✓				
	t_{start}		✓				
	Δt_{Li}		✓			✓	

	ρ_l				✓	
	θ_0				✓	
	ξ_1				✓	
	ξ_2				✓	
	ξ_3					✓
输出参数	d_b					✓
	d_p			✓		
	d_s					✓
	liquidCore		✓			✓
	m_b					✓
	m_{pi}		✓			
	m_s					✓
	n_b					✓
	n_s					✓
	$[n_{pi}]$		✓			
	\vec{P}_{inj}	✓				
	\vec{U}_b					✓
	\vec{U}_p			✓		
	\vec{U}_s					✓
	Δm					✓

WAVE 模型同样包含两部分：1) Blob 入射子模型，2) 一次雾化破碎子模型。下面将按该次序先后介绍两个子模型。

3.2.2.3.2.1 Blob 入射子模型

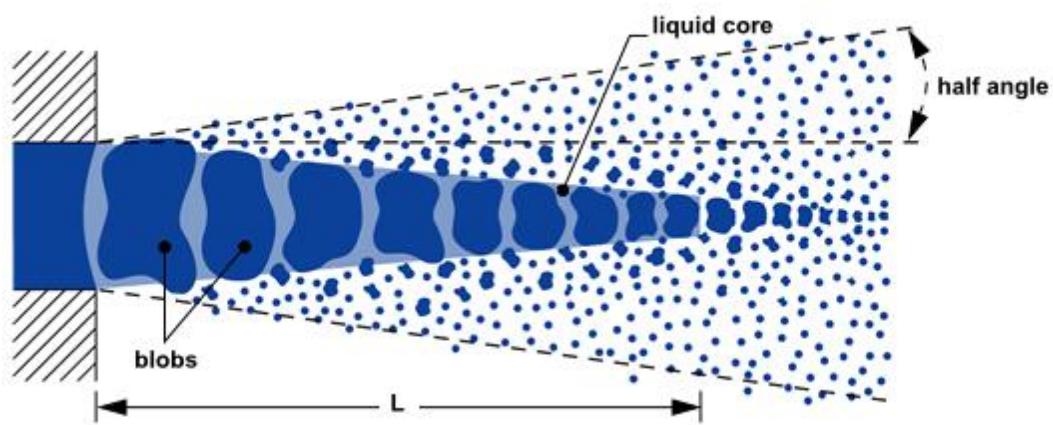


图 3-16 直喷式 blobs 结构示意图

如图 3-16 所示, WAVE 模型的核心思想是将近喷嘴区域的稠密区视为液核, 该液核采用喷射大液泡 blobs 来近似, 这些 blobs 的 Parcel 属性有下文给出。

3.2.2.3.2.1.1 入射位置

直喷式喷嘴 parcel 的入射位置为用户输入直接给定, 各喷点位置对应于其喷嘴位置。

$$\vec{P}_{inj} = \vec{P}_{nozz} \quad (3.2.2.3-1)$$

3.2.2.3.2.1.2 Parcel 的数量、质量与入射时刻

先确定在一个拉格朗日时间步长 Δt_L 内, 各喷点入射 parcel 的质量与数量。通过质量流率容易计算得到第 i 个拉格朗日时间步长 Δt_{Li} 由某喷点入射的 parcel 质量 M_i 。

$$M_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{M} dt = \dot{M} \Delta t_i \quad (3.2.2.3-2)$$

该喷点单位时间注入 parcel 数量 \dot{n}_p

$$\dot{n}_p = \frac{N_p}{t_{end} - t_{start}} \quad (3.2.2.3-3)$$

该喷点在时间步 Δt_i 内注入的 parcel 数量

$$n_{pi} = \dot{n}_p \Delta t_i = \frac{N_p}{t_{end} - t_{start}} \Delta t_i \quad (3.2.2.3-4)$$

考虑到 n_{pi} 的取整微调操作，上式还需要做进一步修正。将 n_{pi} 做四舍五入，得到该喷点在时间步 Δt_i 内注入的 parcel 数量

$$[n_{pi}] \equiv \text{int}(n_{pi} + 0.49) \quad (3.2.2.3-5)$$

而该时间步内单个 parcel 的质量为

$$m_{pi} = \frac{M_i}{[n_{pi}]} \quad (3.2.2.3-6)$$

于是，在当前拉格朗日时间步起始时刻 t_i 在该喷点同时入射 $[n_{pi}]$ 个 parcel。

3.2.2.3.2.1.3 Particle 的粒径

射流的喷入尺寸

$$d_p = \sqrt{C_a} d_0 \quad (3.2.2.3-7)$$

其中， d_0 为喷嘴直径，而 C_a 为压缩系数（contraction coefficient）。

如图 3-16 所示，在喷嘴附近存在着一个液核（liquid core）区域，该液核的长度为

$$L = C_L d_0 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (3.2.2.3-8)$$

其中 C_L 为 Levich 常数。因此，parcel 在 L 长度范围内的破碎受 WAVE 破碎机制控制。

3.2.2.3.2.1.4 Parcel 的速度大小与方向

对于直喷式喷嘴，其质量流率

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2 \rho_l \Delta p} \quad (3.2.2.3-9)$$

那么喷嘴出口的液体流速为

$$U = \frac{\dot{m}}{\rho_l A} = C_d \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_l}} \quad (3.2.2.3-10)$$

而喷射的 blob 的速度方向与轴向 \vec{n}_{ref} 间的夹角

$$\theta = \xi_1 \theta_0 \quad (3.2.2.3-11)$$

参考相关的 [OpenFOAM v7.0 中的代码](#):

```
case imPoint:
{
    const scalar beta = twoPi*rndGen.scalar01();
    const scalar frac = rndGen.scalar01();
    const vector n = normalised(direction_.value(t));
    const vector t1 = normalised(perpendicular(n));
    const vector t2 = normalised(n ^ t1);
    tanVec = t1*cos(beta) + t2*sin(beta);
    theta =
        degToRad
        (
            sqrt
            (
                (1 - frac)*sqr(thetaInner_.value(t))
                + frac*sqr(thetaOuter_.value(t))
            )
        );
    break;
}
```

可见，在实心锥型喷点入射的情况下，式(11)与 OpenFOAM v7.0 中的代码是一致的。

如图 3-6 所示，径向方向

$$\vec{n}_r = \cos \alpha \vec{t}_1 + \sin \alpha \vec{t}_2 \quad (3.2.2.3-12)$$

这里

需要两个随机数。
一个是决定喷射方向与轴向的夹角：即张开的角度；
二个是决定喷射方向的周向角度。

$$\alpha = 2\pi\xi_2 \quad (3.2.2.3-13)$$

那么 blob 的速度方向即为

$$\vec{n}_p = \cos \theta \vec{n}_{ref} + \sin \theta \vec{n}_r \quad (3.2.2.3-14)$$

于是入射 parcel 的速度为

$$\vec{U}_p = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_l}} (\cos \theta \vec{n}_{ref} + \sin \theta \vec{n}_r) \quad (3.2.2.3-15)$$

3.2.2.3.2.2 WAVE 破碎模型

该破碎模型可参考下文中介绍的 KH wave 破碎机制。首先确定射流中的 blob 相对入射点的移动距离

$$\Delta L = |\vec{P}_p - \vec{P}_{inj}| \quad (3.2.2.3-16)$$

当 ΔL 小于液核长度 L 时，blob parcel 的破碎受 WAVE 破碎机制控制。在该破碎机制下，当 We_g 数较低的时候，为袋状破碎（bag breakup），当 We_g 数较高的时候，为剥离破碎（stripping breakup）。发生 wave 破碎前后其父 particle 粒径的变化关系有

$$\frac{dr_p}{dt} = -\frac{(r_p - r_s)}{\tau_{KH}} \quad (3.2.2.3-17)$$

其中 r_p 为父 particle 的半径，而 r_s 为 WAVE 破碎机制下新生成的较小子 particle 的半径

$$r_s = \begin{cases} B_0 \Lambda_{KH} & B_0 \Lambda_{KH} \leq r_p \\ \min \left[\left(\frac{3\pi r_p^2 U_r}{2\Omega_{KH}} \right)^{\frac{1}{3}}, \left(\frac{3r_p^2 \Lambda_{KH}}{4} \right)^{1/3} \right] & B_0 \Lambda_{KH} > r_p \end{cases} \quad (3.2.2.3-18)$$

而破碎时间

$$\tau_{KH} = \frac{3.726B_1r_p}{\Lambda_{KH}\Omega_{KH}} \quad (3.2.2.3-19)$$

其中破碎时间常数 $B_1 = 1.73$ 。

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02r_p(1 + 0.450h^{0.5})(1 + 0.4Ta^{0.7})}{(1 + 0.865We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (3.2.2.3-20)$$

$$\Omega_{KH} = \frac{0.34 + 0.385We_g^{1.5}}{(1 + Oh)(1 + 1.4Ta^{0.6})} \left(\frac{\sigma}{\rho_l r_p^3} \right)^{0.5} \quad (3.2.2.3-21)$$

其中 Weber 数

$$We_g = \frac{\rho_g U_r^2 r_p}{\sigma} \quad (3.2.2.3-22)$$

$$We_l = \frac{\rho_l U_r^2 r_p}{\sigma} \quad (3.2.2.3-23)$$

Ohnesorge 数

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \quad (3.2.2.3-24)$$

Reynolds 数

$$Re_l = \frac{\rho_l U_r r_p}{\mu_l} \quad (3.2.2.3-25)$$

和 Taylor 数

$$Ta = Oh \sqrt{We_g} \quad (3.2.2.3-26)$$

一般认为在 wave 破碎机制下，父 particle 破碎形成两类子 particle。其中一类子 particle 较大，可视为父 particle 剥离之后留下的 particle；而另外一类子 particle 就是剥离 particle 本身，粒径较小。一般来说，在 particle 破碎模型中，需要统计累计脱落质量，当该累计脱落质量达到父 parcel 质量的 3%（也有说 5%，例如 Fluent），才会真正触发 KH wave 破碎事件，该质量分数临界值记为 Y_{cr} 。

当满足 $We_g > We_{cr}$ 且累计脱落质量达到父 parcel 质量的 Y_{cr} 时, particle 会进行剥离破碎。累计脱落质量可由下式计算得出

$$\Delta m = m_0 \left(1 - \left(\frac{2r_b}{d_0} \right)^3 \right) \quad (3.2.2.3-27)$$

m_0 为父 parcel 的初始 (未触发破碎) 质量, d_0 为父 parcel 的初始直径, 而 r_b 为破碎后的大 particle 的粒径, 其值可由父 particle 的半径演化方程(1)得到。对该初值问题直接求解微分方程得解析表达式,

$$r_b^{n+1} = r_s + (r_b^n - r_s) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{KH}}\right) \quad (3.2.2.3-28)$$

上式 $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ 表示拉格朗日时间步。 r_b^n 表示在 t^n 时刻的由破碎得到的大 particle 的半径, 很显然的有 $r_b^0 = d_0/2$ 。

3.2.2.3.2.2.1 破碎 particle 的粒径、数量

根据 WAVE 破碎后的小的 particle 的粒径 r_s , 以及累计脱落质量 Δm (也即破碎后粒径较小的子 particle 对应的 parcel 的质量), 可以计算破碎事件发生以后, 较小的 parcel 中包含的 particle 的数目 n_s 。

$$m_s = \Delta m \quad (3.2.2.3-29)$$

$$m_s = \rho_l \frac{4}{3} \pi n_s r_s^3 \quad (3.2.2.3-30)$$

对于破碎事件发生以后的大的 parcel 属性的计算, 首先根据演化方程(17)计算得到 r_b ; 再根据质量守恒方程, 可以计算得到大 particle 的数目 n_b

$$m_b = m_0 - m_s \quad (3.2.2.3-31)$$

$$n_b = m_b / \left(\frac{4}{3} \rho_l \pi r_b^3 \right) \quad (3.2.2.3-32)$$

3.2.2.3.2.2.2 破碎 particle 的速度

对于 WAVE 破碎后的 particle 的速度的处理，在 OpenFOAM v7 开源代码中其破碎后的两个子 parcel 的速度与破碎事件前的父 parcel 的速度保持一致。而在 KIVA 与 Fluent 中，是在垂直于父 parcel 的运动方向上，对粒径较小的子 parcel 加了一个速度分量

$$\Delta U_{\perp} = c_1 \Lambda_{KH} \Omega_{KH} \quad (3.2.2.3-33)$$

而该垂直方向由如下方法确定。假定父 parcel 的初始速度 $\vec{U}_p = (u, v, w)$ ，那么

$$\vec{i}_1 = \left(1 - \frac{u^2}{U_p^2}, -\frac{uv}{U_p^2}, -\frac{uw}{U_p^2} \right) \quad (3.2.2.3-34)$$

垂直于该速度方向。通过

$$\vec{i}_2 = \frac{\vec{U}_p}{U_p} \times \vec{i}_1 \quad (3.2.2.3-35)$$

可得另一个坐标轴方向。这样 $\frac{\vec{U}_p}{U_p}$ 、 \vec{i}_1 与 \vec{i}_2 构成直角坐标系的三个坐标轴。

引入 [0,1] 间的随机数 ξ_5 ，垂直于父 parcel 的运动方向为，

$$\vec{i}_{\perp} = \cos(2\pi\xi_3) \vec{i}_1 + \sin(2\pi\xi_3) \vec{i}_2 \quad (3.2.2.3-36)$$

小粒径子 parcel 在破碎后其速度大小与父 parcel 相同，仅仅是速度方向改变，且速度在 \vec{i}_{\perp} 方向上的分量大小为 ΔU_{\perp} ，则平行于父 parcel 速度方向上的分量大小为

$$\vec{U}_{\parallel} = \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta U_{\perp}}{U_p} \right)^2} \vec{U}_p \quad (3.2.2.3-37)$$

那么，小粒径子 parcel 的速度为

$$\vec{U}_s = \vec{U}_{\parallel} + \Delta U_{\perp} \vec{i}_{\perp} \quad (3.2.2.3-38)$$

而大粒径子 parcel 的速度可以依据动量守恒给出

$$m_0 \vec{U}_p = m_b \vec{U}_b + m_s \vec{U}_s \quad (3.2.2.3-39)$$

通过上面两式即得出破碎 particle 的速度。

3.2.2.3.3 参考文献

[1] 刘日超. 航空发动机燃烧室喷雾燃烧数值方法及应用研究, 博士论文, 2017

3.2.2.4 二次雾化 KH-RT 模型开发集成

3.2.2.4.1 技术路线图

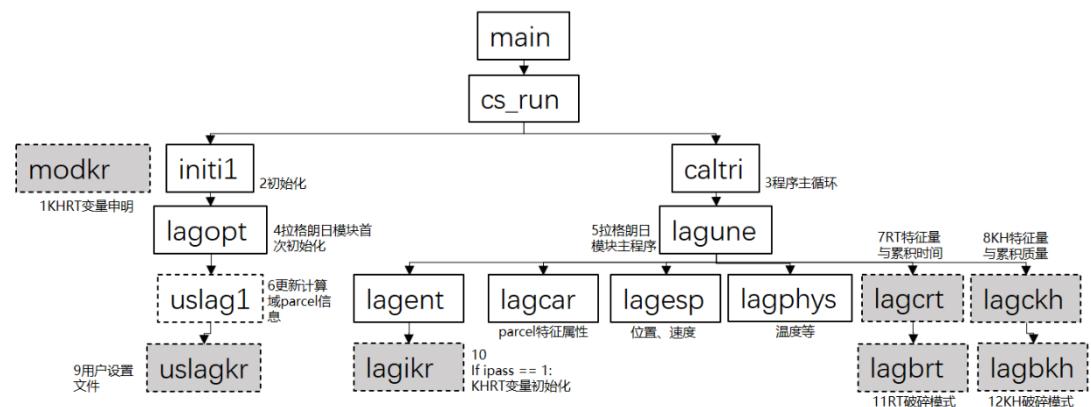


图 3-17 二次破碎 KHRT 模型模块设计图

* 灰色虚线框为开发者新加入文件名，白色虚线框（dashed line）表示需要开发者修改的原有文件。

* 左列（init1 以下）为初始化文件，调用用户设置参数，右列为循环计算文件。

1, modkr: KHRT 模型相关变量声明模块；

2, init1: CS 初始化子程序；

3, caltri: CS 主循环子程序；

4, lagopt: Lagrange 模块首次初始化；

- 5, lagune: Lagrange 模块主循环子程序;
- 6, uslag1: Lagrange 模块计算参数设置文件, 由用户输入;
- 7, lagcrt: 二次雾化过程中, 计算 RT 雾化模式的特征波长、累积时间等, 并判断是否达到 RT 破碎特征时间。如果达到, 调用 lagbrt, 执行 RT 破碎模式。否则, 执行 KH 破碎判断 lagckh;
- 8, lagckh: 二次雾化模型中, 计算 KH 雾化模型最不稳定波长, 计算累积脱离质量, 并判断是否达到用户设定阈值。如达到, 则调用 lagbkh, 执行 KH 破碎模式。否则, 进入下一个时间步;
- 9, uslagkr: KHRT 雾化模型参数设置, 由用户设置输入。在 uslag1 中判断是否调用该雾化模型, 如果是, 则 uslag1 调用 uslagkr; 值得注意的是, 如果开启 LISA 或者 WAVE 模型, 那么此处均需多一个判断, 如果 liquidCore 值为 0, 则继续调用 KHRT 模型, 如为 1 则不调用 KHRT 模型。
- 10, lagikr: **Lagrange** 模块第一次执行时 (ipass=1), 执行一次 KHRT 雾化模型参数的初始化工作;
- 11, lagbrt: lagcrt 中, 如果累积时间达到 RT 破碎特征时间, 则调用此模块执行 RT 雾化破碎 (粉碎) 模式。RT 破碎模式中, 流场不生成新的 parcel, 仅需要对父 parcel 的 particle 粒径、包含 particle 的数目、速度等重新赋值。如果未达到 RT 破碎特征时间, 则进行 KH 破碎模式判断。完毕后, 进入下一个时间步;
- 12, lagbkh: lagckh 中, 如果累积脱离质量大于 3% 或 5% 且本时间步未执行 RT 破碎模式, 则进入 KH 破碎模式, 调用该子程序 lagbkh 执行 parcel 的二次雾化。KH 破碎模式中, 一个父 parcel 生成两个子 parcel。因此, 除了 parcel 的属性需要重新计算赋值外, 还需要调用 lagnew 标记新的子 parcel 的坐标位置和网格索引。

3.2.2.4.1.1 二次破碎 KHRT 流程图

在每一个拉格朗日时间步内，需要做两个累计统计。一是在满足 RT 机制影响的条件下 ($\Lambda_{RT} < d_p$)，累计 RT 波的生长时间；二是在气体 $We > 12$ 的条件下，累计受 KH 机制而剥离的 particle 质量。哪个条件率先成立就实现该模式下的二次破碎。如果在同一时间步内两者同时满足破碎条件，则优先选 RT 模式。

触发破碎机制以后，需要新增或修改既有 parcel 的属性（速度、particle 数、粒径等）。

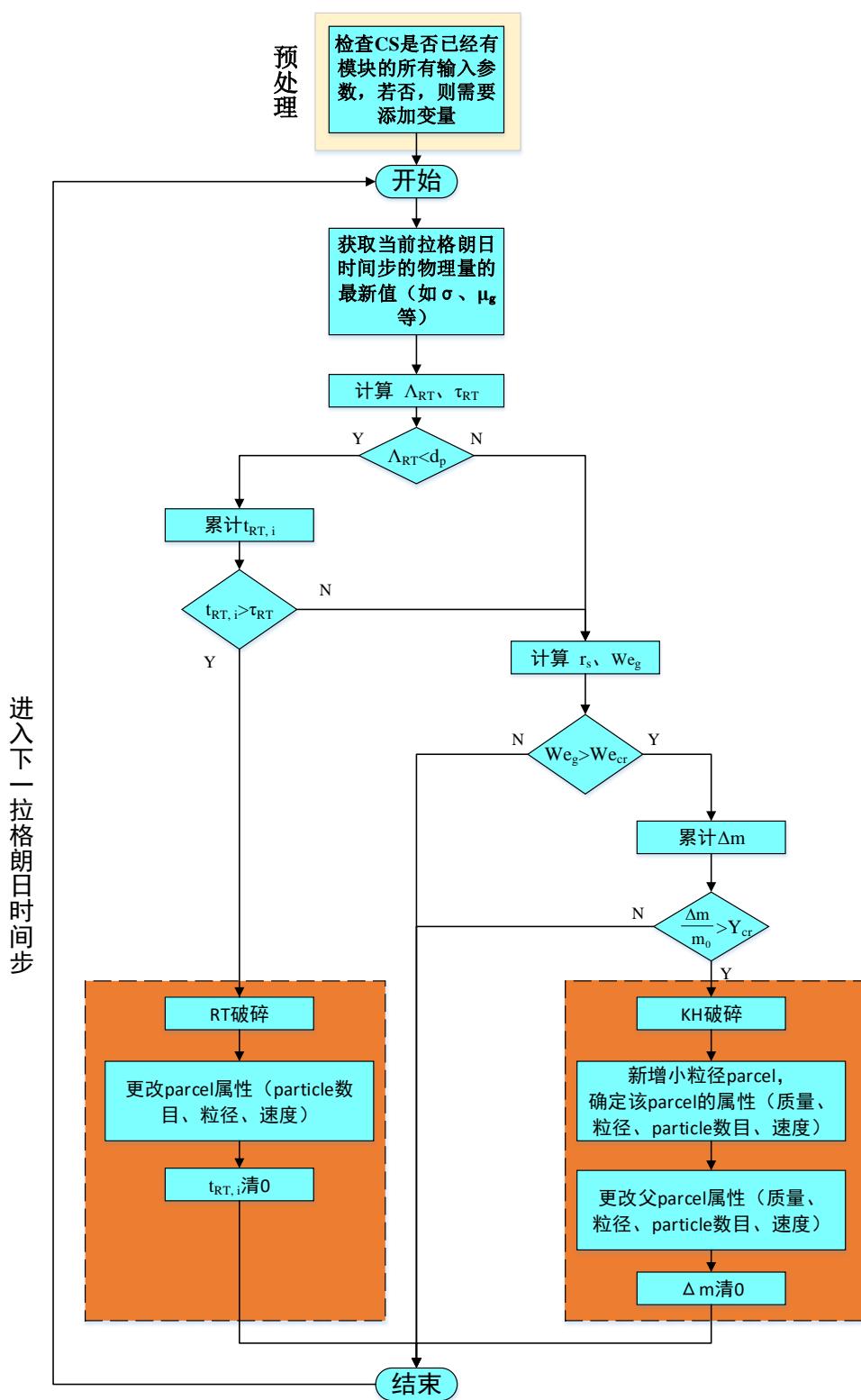


图 3-18 KHRT 方法流程图

3.2.2.4.2 理论介绍

参数列表

B_0	常数	
B_1	常数	
C_{RT}	常数	
C_τ	常数	
c_1	常数	
d_0	未发生二次破碎事件前的 particle 粒径	m
d_b	KH 破碎后的较大的子 particle 的粒径	m
d_p	父 particle 粒径	m
d_s	KH 破碎后的较小的子 particle 的粒径	m
d_{RT}	RT 破碎粒径	m
g_t	particle 运动加速度	m s^{-2}
K_{RT}	最大增长扰动波的波数	m^{-1}
m_0	未发生二次破碎事件前的 parcel 质量	kg
m_b	KH 破碎后大粒径子 parcel 的质量	kg
m_s	KH 破碎后小粒径子 parcel 的质量	kg
Δm	KH 累计脱落质量	kg
n_b	KH 破碎后的粒径较大的 parcel 包含的 particle 数	
n_p	父 parcel 包含的 particle 数	
n_{part}	RT 破碎后 parcel 包含的 particle 数	
n_s	KH 破碎后的粒径较小的 parcel 包含的 particle 数	
Oh	Ohnesorge 数	
Re	Reynolds 数	
r_b	KH 破碎后的较大的子 particle 的半径	m

r_p	破碎发生前的 particle 半径	m
r_s	KH 破碎后的较小子 particle 半径	m
Ta	Taylor 数	
$t_{RT,i}$	到 t_i 时刻 (即第 i 个时间步长的起始时刻, 第一个时间步长的区间范围是 $[t_1, t_2]$) 为止, 累计 RT 波在 particle 表面的生长时间	s
Δt_{Li}	拉格朗日时间步长	s
\vec{U}_b	KH 破碎后的较大子 particle 速度	m s^{-1}
\vec{U}_p	父 particle 速度	m s^{-1}
\vec{U}_{RT}	RT 破碎后的 particle 速度	m s^{-1}
\vec{U}_s	KH 破碎后的较小子 particle 速度	m s^{-1}
\vec{U}_r	气液相对速度差	m s^{-1}
ΔU_\perp	KH 破碎分离垂直速度	m s^{-1}
We	Weber 数	
We _{cr}	KH 剥离破碎临界 We 数	
Y_{cr}	KH 累计脱离质量分数临界值	
	希腊字符	
Λ_{KH}	KH 机制下的最不稳定扰动波的波长	m
Λ_{RT}	RT 机制下的最不稳定扰动波的波长	m
μ_l	液体粘度	Pa s
Ω_{KH}	KH 机制下的扰动波的最大增长率	s^{-1}
Ω_{RT}	RT 机制下的扰动波的最大增长率	s^{-1}
ρ_g	气体密度	kg m^{-3}
ρ_l	液滴密度	kg m^{-3}
σ	表面张力	N m^{-1}
τ_{KH}	KH 破碎特征时间	s

τ_{RT}	RT 破碎特征时间	s
ξ_1	[0, 1]区间随机数	

输入输出参数列表 checklist

		KH wave 破碎机制	RT 破碎 机制
输入参数	B_0	√	
	B_1	√	
	C_{RT}		√
	C_τ		√
	c_1	√	
	d_0	√	
	\vec{U}_p	√	
	\vec{U}_r	√	√
	We_{cr}	√	
	Y_{cr}	√	
	Δt_i		√
	μ_l	√	
	ρ_g	√	
	ρ_l	√	
	σ	√	
输出参数	d_b	√	
	d_s	√	
	d_{RT}		√
	m_b	√	
	m_s	√	
	n_b	√	

	n_{part}		✓
	n_s	✓	
	$t_{RT,i}$		✓
	\vec{U}_b	✓	
	\vec{U}_{RT}		✓
	\vec{U}_s	✓	
	Δm	✓	

3.2.2.4.2.1 KH wave 破碎机制

KH 破碎机制与前述 WAVE 模型中的一次破碎子模型机制相同，在该破碎机制下，当 We_g 数较低的时候，为袋状破碎 (bag breakup)，当 We_g 数较高的时候，为剥离破碎 (stripping breakup)。发生 wave 破碎前后其父 particle 粒径的变化关系有

$$\frac{dr_p}{dt} = -\frac{(r_p - r_s)}{\tau_{KH}} \quad (3.2.2.4-1)$$

其中 r_p 为父 particle 的半径，而 r_s 为 wave 破碎机制下新生成的较小子 particle 的半径

$$r_s = \begin{cases} B_0 \Lambda_{KH} & B_0 \Lambda_{KH} \leq r_p \\ \min \left[\left(\frac{3\pi r_p^2 U_r}{2\Omega_{KH}} \right)^{\frac{1}{3}}, \left(\frac{3r_p^2 \Lambda_{KH}}{4} \right)^{1/3} \right] & B_0 \Lambda_{KH} > r_p \end{cases} \quad (3.2.2.4-2)$$

而破碎时间

$$\tau_{KH} = \frac{3.726 B_1 r_p}{\Lambda_{KH} \Omega_{KH}} \quad (3.2.2.4-3)$$

其中破碎时间常数 $B_1 = 1.73$ 。

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02r_p(1 + 0.450h^{0.5})(1 + 0.4Ta^{0.7})}{(1 + 0.865We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (3.2.2.4-4)$$

$$\Omega_{KH} = \frac{0.34 + 0.385We_g^{1.5}}{(1 + Oh)(1 + 1.4Ta^{0.6})} \left(\frac{\sigma}{\rho_l r_p^3} \right)^{0.5} \quad (3.2.2.4-5)$$

其中 Weber 数

$$We_g = \frac{\rho_g U_r^2 r_p}{\sigma} \quad (3.2.2.4-6)$$

$$We_l = \frac{\rho_l U_r^2 r_p}{\sigma} \quad (3.2.2.4-7)$$

Ohnesorge 数

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \quad (3.2.2.4-8)$$

Reynolds 数

$$Re_l = \frac{\rho_l U_r r_p}{\mu_l} \quad (3.2.2.4-9)$$

和 Taylor 数

$$Ta = Oh \sqrt{We_g} \quad (3.2.2.4-10)$$

一般认为在 wave 破碎机制下，父 particle 破碎形成两类子 particle。其中一类子 particle 较大，可视为父 particle 剥离之后留下的 particle；而另外一类子 particle 就是剥离 particle 本身，粒径较小。一般来说，在 particle 破碎模型中，需要统计累计脱落质量，当该累计脱落质量达到父 parcel 质量的 3%（也有说 5%，例如 Fluent），才会真正触发 KH wave 破碎事件，该质量分数临界值记为 Y_{cr} 。

当满足 $We_g > We_{cr}$ 时，particle 会进行剥离破碎。累计脱落质量可由下式计算得出

$$\Delta m = m_0 \left(1 - \left(\frac{2r_b}{d_0} \right)^3 \right) \quad (3.2.2.4-11)$$

m_0 为父 parcel 的初始（未触发破碎）质量， d_0 为父 parcel 的初始直径，而 r_b 为破碎后的大 particle 的半粒径，其值可由父 particle 的半径演化方程(1)得到。对该初值问题直接求解微分方程得解析表达式，

$$r_b^{n+1} = r_s + (r_b^n - r_s) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{KH}}\right) \quad (3.2.2.4-12)$$

上式 $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ 表示拉格朗日时间步。 r_b^n 表示在 t^n 时刻的由破碎得到的大 particle 的半径，很显然的有 $r_b^0 = d_0/2$ 。

3.2.2.4.2.1.1 破碎 particle 的粒径、数量

根据 KH 破碎后的小的 particle 的粒径 $r_s = B_0 \Lambda_{KH}$ ，以及累计脱落质量 Δm （也即破碎后粒径较小的子 particle 对应的 parcel 的质量），可以计算破碎事件发生以后，较小的 parcel 中包含的 particle 的数目 n_s 。

$$m_s = \Delta m \quad (3.2.2.4-13)$$

$$m_s = \rho_l \frac{4}{3} \pi n_s r_s^3 \quad (3.2.2.4-14)$$

对于破碎事件发生以后的大的 parcel 属性的计算，首先根据演化方程(12)计算得到 r_b ；再根据质量守恒方程，可以计算得到大 particle 的数目 n_b

$$m_b = m_0 - m_s \quad (3.2.2.4-15)$$

$$n_b = m_b / \left(\frac{4}{3} \rho_l \pi r_b^3 \right) \quad (3.2.2.4-16)$$

3.2.2.4.2.1.2 破碎 particle 的速度

对于 KH 破碎后的 particle 的速度的处理，在相关开源代码中其破碎后的两

个子 parcel 的速度与破碎事件前的父 parcel 的速度保持一致。而在 KIVA 与 Fluent 中，是在垂直于父 parcel 的运动方向上，对粒径较小的子 parcel 加了一个速度分量

$$\Delta U_{\perp} = c_1 \Lambda_{\text{KH}} \Omega_{\text{KH}} \quad (3.2.2.4-17)$$

如 KIVA 中的相关程序语句：

```
delv=cnst1*wavlng*growth
```

而该垂直方向由如下方法确定。假定父 parcel 的初始速度 $\vec{U}_p = (u, v, w)$ ，那么

$$\vec{i}_1 = \left(1 - \frac{u^2}{U_p^2}, -\frac{uv}{U_p^2}, -\frac{uw}{U_p^2} \right) \quad (3.2.2.4-18)$$

垂直于该速度方向。通过

$$\vec{i}_2 = \frac{\vec{U}_p}{U_p} \times \vec{i}_1 \quad (3.2.2.4-19)$$

可得另一个坐标轴方向。这样 $\frac{\vec{U}_p}{U_p}$ 、 \vec{i}_1 与 \vec{i}_2 构成直角坐标系的三个坐标轴。

引入 [0,1] 间的随机数 ξ_1 ，垂直于父 parcel 的运动方向为，

$$\vec{i}_{\perp} = \cos(2\pi\xi_1) \vec{i}_1 + \sin(2\pi\xi_1) \vec{i}_2 \quad (3.2.2.4-20)$$

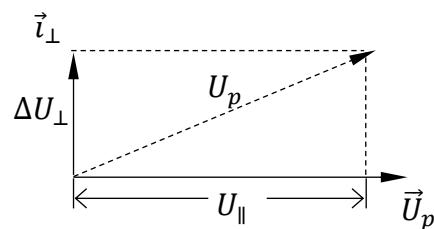


图 3-19 破碎后小粒径子 parcel 的速度计算示意图

如图 3-19 所示，小粒径子 parcel 在破碎后其速度大小与父 parcel 相同，仅仅是速度方向改变，且速度在 \vec{i}_\perp 方向上的分量大小为 ΔU_\perp ，则平行于父 parcel 速度方向上的分量大小为

$$\vec{U}_\parallel = \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta U_\perp}{U_p}\right)^2} \vec{U}_p \quad (3.2.2.4-21)$$

那么，小粒径子 parcel 的速度为

$$\vec{U}_s = \vec{U}_\parallel + \Delta U_\perp \vec{i}_\perp \quad (3.2.2.4-22)$$

而大粒径子 parcel 的速度可以依据动量守恒给出

$$m_0 \vec{U}_p = m_b \vec{U}_b + m_s \vec{U}_s \quad (3.2.2.4-23)$$

通过上面两式即得出破碎 particle 的速度。

3.2.2.4.2.2 RT 破碎机制

该模式下，不产生新的 parcel，只对现有的 parcel 属性进行破碎更新，增长最快的波的特征频率

$$\Omega_{RT} = \left(\frac{2 \left(|g_t| (\rho_l - \rho_g) \right)^{3/2}}{3(3\sigma)^{1/2} (\rho_l + \rho_g)} \right)^{1/2} \quad (3.2.2.4-24)$$

这里的 g_t 是 particle 运动方向上的加速度，在程序中将添加是否开启重力的选项，针对 g_t 做相应补充。 g_t 通常是受到气体的曳力

$$g_t = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_g U_r^2}{\rho_l r_p} \quad (3.2.2.4-25)$$

在该增长率条件下的波数

$$K_{RT} = \left(\frac{|g_t| (\rho_l - \rho_g)}{3\sigma} \right)^{1/2} \quad (3.2.2.4-26)$$

该条件下的波长

$$\Lambda_{RT} = \frac{2\pi C_{RT}}{K_{RT}} \quad (3.2.2.4-27)$$

其中通常有 $C_{RT} = 0.1$ 。当满足 $\Lambda_{RT} < d_p$ 时，需要累计 RT 波的生长时间，

$$t_{RT,i} = t_{RT,i-1} + \Delta t_i \quad (3.2.2.4-28)$$

RT 模式破碎的特征时间

$$\tau_{RT} = \frac{C_\tau}{\Omega_{RT}} \quad (3.2.2.4-29)$$

通常 $C_\tau = 0.5$ 。

3.2.2.4.2.2.1 破碎 particle 的粒径、数量

RT 破碎后的粒径由最不稳定波的波长 Λ_{RT} 给出，

$$d_{RT} = \Lambda_{RT} \quad (3.2.2.4-30)$$

进一步计算得到，parcel 内含有的 particle 数量

$$n_{part} = \frac{m_0}{\frac{1}{6}\pi d_{RT}^3} \quad (3.2.2.4-31)$$

3.2.2.4.2.2.2 破碎 particle 的速度

RT 破碎事件前后，particle 的速度保持不变，即

$$\vec{U}_{RT} = \vec{U}_p \quad (3.2.2.4-32)$$

3.2.2.4.3 参考文献

[1] Beale J C , Reitz R D . Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model[J]. Atomization and Sprays, 1999, 9(6):623-650.

[2] Patterson M A, Reitz R D. Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on

Diesel Engine Combustion and Emission[J]. SAE transactions, 1998, 107(3): 27-43.

[3] Reitz R D . Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays[J]. atomization & spray tech, 1987, 3(309):309-337.

[4] Macpherson G B , Nordin N , Weller H G . Particle Tracking In Unstructured, Arbitrary Polyhedral Meshes For Use In Cfd And Molecular Dynamics[J]. Communications in numerical methods in engineering, 2009, 25(3):263-273.

3.2.2.5 雾化模型测试验证

本项试验研究目的是通过试验对离心喷嘴和直喷喷嘴雾化模型进行验证和修正，测量对象是两种喷嘴的雾化特性。即通过对两种喷嘴的雾化特性进行测量，获得喷嘴的试验数据并形成相应数据库，再通过对比数据库数据与雾化模型仿真结果，以实现雾化模型的验证和修正目的。

试验主要分为常温常压来流条件的离心喷嘴试验与常温常压来流及横向流条件的直喷喷嘴试验两部分，两者均仅采用单个喷嘴进行试验。喷雾试验通过调整流量、流速等流体参数实现工况状态控制，离心喷嘴喷雾试验的工况状态参数选取范围：韦伯数（We）20~700，动量比 40~100；直喷喷嘴喷雾试验的工况状态参数选取范围：韦伯数（We）30~170，动量比 10~30。

数据库参数（测量对象）包括液滴的索特平均直径（SMD）、液滴速度等微观流体参数和雾化锥角、穿透深度、穿透轨迹等宏观流体参数；

测量方法（技术）包括相位多普勒粒子分析(PDPA)、图像法等；

试验成果包括试验验证数据库（一套）、离心喷嘴（一套）和直射喷嘴（一套）。

3.2.3 创新性

本工作在燃油雾化机理探索和模型开发优化方面开展深入的研究，力求提升

燃油雾化数值模拟预测精度，进一步推动先进发动机燃烧室的设计研发。基于 Code_Saturne 4.0 版本，针对直喷式与离心式两种喷嘴，构建空心锥结合 Rosin-Rammler 分布喷射模型、线性不稳定液膜雾化 LISA 模型、WAVE 模型以及 KH-RT 模型，将模型与航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真程序集成。开展雾化流场的数值模拟研究，根据两种喷嘴的雾化宏观形态以及液滴微观粒径、速度等试验数据对雾化模型进行验证与优化。

3.3 技术风险分析与规避措施

3.3.1 技术风险分析

本项目属于技术密集型项目，开发过程客观上存在一定的风险。软件开发项目的管理本质上是风险管理。IEEE 研究发现，通过合理有效的管理，50%-70% 的开发风险可以被检测到，同时 70%-90% 的风险可以有效避免。Microsoft 公司的量化研究也表明，5% 的技术风险管理投入，能够使项目如期完成的概率增加 50%-75%。管理者必须处理好技术带来的不确定性，才能提高项目成功的可能性。构建对项目的技术风险的评估分析并确定合适的规避措施方案，对本开发项目成功具有重要的意义。

本项目的在开发过程的风险主要存在于以下几点：

A、方案与平台的潜在冲突

本方案借鉴了 OpenFOAM 开源平台的实施过程和过程基于的模型理论。OpenFOAM 平台由社区维护，并不保证该过程以及过程基于的理论模型的正确性。再者，尽管 OpenFOAM 平台架构是基于面向对象开发，结构化清晰，但 Code_Saturne 平台基于面向过程开发，混合使用 C、Fortran 和 Python 三种编程语言，结构化清晰度较 OpenFOAM 弱。因此，无法完全忠实 OpenFOAM 的实施过程。

B、Code_Saturne 4 版本较为老旧，已经发现，该版本尤其是 LPT 模块存在若干错误。由于此版本失去了失去维护，很多潜在错误也难以在公开文献中发现。该

平台的最新版本为 6.0.2 版本，并且开发语言已经从三种语言混编，改为 C 为主，结合少量 Python 的结构，基本摒弃了 Fortran 语言，减少了语言混编的风险。

C、实施方案存在的潜在风险。现实施方案是基于现有的技术经验和对 Code_Saturne 平台的理解制定。实际实施过程中，肯定遇到与拟定方案不同的情况。

D、其它风险。

3.3.2 构建技术风险预警机制

风险不能完全避免，但通过科学合理的风险管理措施可以有效的规避大部分技术风险，有效提高项目如期完成的成功率。风险管理的核心在于预警，包括监督和反馈。预警和技术实施监督小组，是风险管理的组织主体。图 3-20 是风险管理过程的基本逻辑框架。

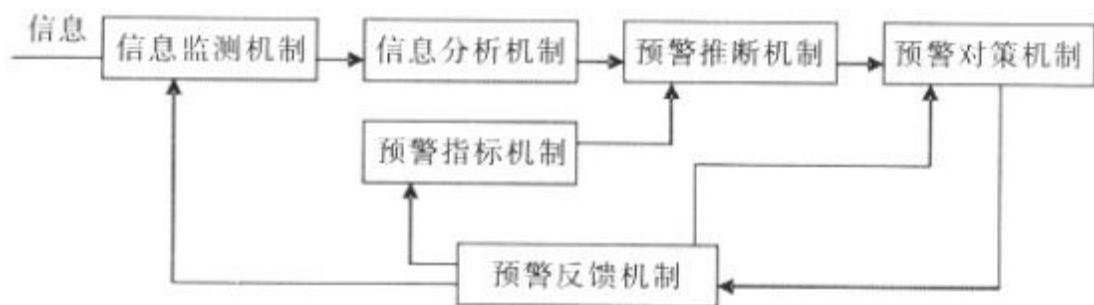


图 3-20 技术风险预警机制构建图

简单来说，风险控制过程可以分为四个步骤

3.3.2.1 预警信息监测机制

信息监测即实时监测项目的进展信息以及其导致的不确定性后果的信息。

3.3.2.2 预警信息分析与对错机制

分析项目延期的原因，制定具体的规避措施。

3.3.2.3 预警指标机制

制定项目进展指标，建立实时指标监督机制。

3.3.2.4 预警反馈机制

管理人员与技术人员及时沟通，及时反馈对项目延期的分析，敦促技术实施人员及时纠正和改进工作方法。

4 进度安排、成果形式和应用方向

4.1 进度安排

合同签订之日起，时间为 T0，项目开发周期为 6 个月。

时间节点 (月)	完成项目	备注
T0	✓ 签订合同	
T0+2	✓ 完成 RR 模型代码植入初步测试; ✓ 开始试验工作	完成撰写 RR 模型技术文档;
T0+3	✓ 完成 LISA 模型代码植入与初步测试	完成撰写 LISA 模型技术文档
T0+4	✓ 完成 WAVE 模型代码植入与初步测试; ✓ 完成试验，获得试验数据	1，完成撰写 WAVE 模型技术文档; 2，完成试验报告文档
T0+5	✓ 完成 KH-RT 模型代码植入与初步测试	完成撰写 KH-RT 二次雾化模型技术文档

T0+6	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 完成综合测试与结果校验; ✓ 完成项目结题 	<ol style="list-style-type: none"> 1, 完成撰写雾化模型试验验证数据报告; 2, 撰写测试与结果校验文档; 3, 提交软件源码; 4, 提交燃油喷嘴雾化模型手册; 5, 提交用户使用指南; 6, 提交软件二次开发接口说明; 7, 提交测试分析报告; 8, 提供试验件
------	--	---

- 1, 初次测试包括相应模型的编译和健壮性测试, 以及简单算例验证;
 2, 综合测试包括合同要求的除初次测试外的所有测试, 特别是各雾化模型在相应几何构型下的耦合连接测试。

4.2 成果形式

包括研究报告、软件模块代码、软件配套文档、验证算例数据以及燃油喷嘴试验件。

4.3 应用方向

航空发动机燃烧室喷嘴雾化数值仿真。

5 预期成果和效益

5.1 成果及成果形式

5.1.1 研究报告

离心喷嘴射流雾化流场数值模拟研究报告 (1 份); 直射式喷嘴射流雾化流

场数值模拟研究报告（1份）；雾化模型试验验证数据报告（1份）。

5.1.2 软件模块代码

与航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真程序集成后的离心喷嘴和直射喷嘴雾化流场数值模拟软件模块源代码，其中离心喷嘴一次雾化模型为空心锥结合 Rosin-Rammler 分布喷射模型、线性不稳定液膜雾化 LISA 模型两种，二次雾化模型为 KH-RT 模型；直喷喷嘴一次雾化模型为 WAVE 模型，二次雾化模型为 KH-RT 模型。

5.1.3 软件配套文档

燃油喷嘴雾化模型理论手册；用户使用指南；软件二次开发接口说明；软件测试分析报告。

5.1.4 验证算例数据

验证用离心和直射喷嘴模型验证用数据 1 套；燃油雾化模型验证算例 1 套。

5.1.5 试验件

燃油喷嘴试验件 2 套（离心喷嘴和直射喷嘴各 1 套）。

5.2 应用方向、前景和效益

本项目成果应用方向为航空发动机燃烧室喷嘴的雾化仿真，衔接燃烧室的喷雾燃烧仿真模块，结合实验为航空发动机燃烧室的设计提供有效数据支撑。

6 知识产权分析

本项目产生的全部知识产权归甲方所有，包括研究报告、软件模块代码、软件配套文档、离心和直射喷嘴模型验证用数据等在内的所有知识产权均归甲方所

有。

7 经济概算（万元）

8 合作单位任务分工及经费分配

无。

9 课题组主要成员

拟派本项目服务团队一览表

工作岗位	姓名	职务	学历	专业	联系方式	
					单位电话	移动电话
项目负责人	傅彦国	总经理	硕士	机械设计及理论	021-65650975	13918203355
技术负责人	符凯	技术开发经理	博士	生物技术	021-65650975-8007	15189739307
研发人员	张龙	技术咨询经理	硕士	制冷与低温工程	021-65650975-8003	18217511878
研发人员	李勇	研发工程师	硕士	船舶与海洋工程	021-65650975	17365739576
研发人员	沙文慧	研发工程师	硕士	热能工程	021-65650975	13262591071
研发人员	张露杭	研发工程师	硕士	核能科学与工程	021-65650975-	15800392326

					8012	
研发人员	李明浩	研发工程师	硕士	船舶与海洋工程	021-65650975	18733062801
测试人员	张洪波	测试工程师	硕士	纺织科学与工程	021-65650975-8002	18817333901
商务专员	印然	商务专员	本科	财务管理	021-65650975	15821478083

技术负责人简历表

姓名	符凯	性别	男	年龄	39
职务	技术开发经理	职称	无	学历	博士
参加工作时间	2010 年		从事项目负责人年限		10
证件名称	/		证书编号	/	
主要工作经历					
时间	参加过的类似项目	担任职务	业主方及联系电话		
2016 年	CERT 台架壳外水膜流动特性 CFD 研究	项目成员	常华健 010-56681695		
2018 年	三代核电技术升级科研项目华龙一号乏燃料水池热工水力设计与安全分析软件模块开发	项目负责人	罗萍 18911532150		
2019 年	发动机内部过程精益仿真系统	项目负责人	金盛宇 18017565520		
2019 年	发动机喷雾仿真计算软件	项目负责人	029-85207370		

10 研究条件及保障措施

10.1 承担单位基本情况

上海积鼎信息科技有限公司成立于 2008 年，该公司致力于为企业、研究机构、高校等提供先进的设计、分析、测试产品，并从事项目咨询以及产品开发服务。客户涵盖航空、航天、船舶、核工业、石油石化、汽车、机械电子、家电等多个行业，产品覆盖结构、流体、噪声、热分析等相关产品、技术服务及软件开发，从 2012 年开始该公司主打多相流整体解决方案，并已经成为主要业务方向，为用户提供多相流模拟软件、测量设备、项目咨询、软件产品开发等多种服务，在国内的国防军工、石油石化、核电能源等领域有众多客户和深入的合作。上海积鼎信息科技有限公司在今年上线的多相流在线平台（www.cmfd.com.cn）是业界唯一针对产业和科研的技术推广及交流平台。

上海积鼎信息科技有限公司具有雄厚的流体力学技术实力，是中国化工学会过程模拟及仿真专业委员会的成员单位，同时得到中国计量测试学会多相流测试技术专业委员会、上海市颗粒学会的大力支持。

上海积鼎信息科技有限公司目前已和西安交通大学、哈尔滨工程大学、中国石油大学(北京)、中国地质大学、四川大学化学工程学院、浙江大学等成立了 TransAT 软件技术中心，以促进多相流模拟仿真技术在国内科研领域的推广和应用。上海积鼎信息科技有限公司同时拥有多家企业客户，如上海航天技术研究院第 805 研究所、上海航天控制工程研究所、上海卫星工程研究所、中国石油气举技术中心、中海油研究总院、中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院、国家电投中央研究院、中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心、航空工业太原航空仪表有限公司、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、国家电投集团公司中央研究院、中国原子能科学研究院、沪东重机有限公司、中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所、中国航空无线电电子研究所、中航(苏州)雷达与电子技术有限公司、四川九洲电器集团有限责任公司、中国科学院工程热物理研究所、中国科学院应用物理研究所、中国科学院山西煤炭化学研究所、

中国人民解放军第二炮兵装备研究院、广东省标准化研究院、中国科学院技术物理研究所、清华大学、复旦大学、上海交通大学等。

上海积鼎信息科技有限公司拥有较雄厚的 CFD 技术团队，公司拥有多名从事 CFD 研究的博士与硕士及国内知名专家顾问，团队具有丰富的 CFD 商业软件的应用经验以及多相流算法研究和程序开发经验。公司旗下在 2017 年下半年上线多相流在线网站及微信公众号，集聚行业资源，汇总行业热点难点，为多相流领域的解决方案提供一个开放共享的交流平台，目前已有近千名受众。上海积鼎信息科技有限公司已承担过多项 CFD 咨询服务项目，为用户提供相关多相流、相变换热、复杂湍流等问题的 CFD 解决方案，并为多家企业客户提供高级培训、项目领航、咨询开发等工作。

10.2 研究条件

上海积鼎信息科技有限公司严格按照 ISO9001 的质量要求及操作规范进行项目的开发工作，除开发设备及软件外，该公司现有高性能工作站若干，同时与北京并行科技股份有限公司、上海超级计算中心、无锡超级计算中心、同济大学航空航天学院仿真中心等建立了长期合作关系，利用其硬件平台进行大规模的仿真模拟计算。

上海积鼎信息科技有限公司具有完成物理模型验证试验的能力，公司与上海理工大学颗粒与两相流测量技术研究所蔡小舒团队、哈尔滨工程大学核科学与技术学院谭思超团队等多个实验研究团队保持密切的多相流测试和试验合作，能借助合作伙伴的相关实验平台完成喷嘴雾化特性的验证试验。

企业设备：

用于计算、测试的塔式服务器（Dell T630）1 台；

用于计算、测试的服务器（Dell 7500）1 台；

用于计算、开发的电脑（Dell）12 台；

吕梁超算 Intel Xeon E5-2692 96 核；

北龙超云 E5-2670 80 核；

北京并行超算云平台 CPU E5-2678 v3 2.50GHz 64G

场地：

上海积鼎信息科技有限公司的办公地址在上海市杨浦区国定路 335 号 2 号路 1503。

10.3 外协条件

不涉及。

10.4 管理保障

根据本工程所具备的资源和系统环境等约束条件，我们将与用户单位一道努力，按照 ISO9000 质量体系要求，通过质量管理协调各种因素在系统维护过程中 的作用，有效的利用资源，完成预定任务。

按照 ISO9000 体系框架和要素的要求，紧密结合计算机系统维护项目的特点，制定出在各个环节的标准，来提高维护服务水平，控制质量。严格依据软件开发与测试标准规范开展工作。

本公司把 ISO9000 质量体系认证作为加强质量管理、提高企业竞争力的一张王牌。经过 ISO9000 质量认证工作，本公司取得了原先意想不到的效果，产生了巨大的效益。

10.4.1 质量保证计划

10.4.1.1 编制和评审质量计划

制定质量保证计划：依据项目计划及项目质量目标确定需要检查的主要过程和工作产品，识别项目过程中的干系人及其活动，估计检查时间和人员，并制定出本项目的质量保证计划。

质量保证计划的主要内容包括：例行审计和里程碑评审，需要监督的重要活动和工作产品，确定审计方式，根据项目计划中的评审计划确定质量保证人员需要参加的评审计划。明确质量审计报告的报送范围。

质量保证计划的评审：质量保证计划需要经过评审方能生效，以确保质量保证计划和项目计划的一致性。经过批准的质量保证计划需要纳入配置管理。当项目计划变更时，需要及时更改和复审质量保证计划。

10.4.1.2 质量检查

根据质量保证计划进行质量的审计工作，并发布质量审计报告。

审计的主要内容包括：是否按照过程要求执行了相应的活动，是否按照过程要求产生了相应的工作产品。本项目中对质量的控制主要体现在不同阶段的审计当中。

10.4.1.3 不符合项的跟踪处理

对审计中发现的不符合项，要求项目组及时处理，质量保证人员需要确认不符合项的状态，直到最终的不符合项状态为“完成”为止。

10.4.2 质量管理责任分配

我方在开发项目上按照规范化软件的生产方式进行生产。每个项目除配备了

项目开发所需角色外，还专门配备了质量保证小组、配置管理小组、测试小组来确保质量管理的实施，下面针对这三种角色进行说明。

10.4.2.1 质量保证小组职责

质量保证小组作为质量保证的实施小组，在项目开发的过程中几乎所有的部门都与质量保证小组有关。

质量保证小组的主要职责是：以独立审查方式，从第三方的角度监控软件开发任务的执行，分析项目内存在的质量问题，审查项目的质量活动，给出质量审计报告。就项目是否遵循已制定的计划、标准和规程，给开发人员和管理层提供反映产品和过程质量的信息和数据，使他们能了解整个项目生存周期中工作产品和过程的情况，提高项目透明度，从而支持其交付高质量的软件产品。

质量保证人员依据质量保证计划，通过质量审计报告向项目经理及有关人员提出已经识别出的不符合项，并跟踪不符合项的解决过程，通过审计周报或者审计月报向项目经理提供过程和产品质量数据，并与项目组协商不符合项的解决办法。

质量保证小组的检测范围主要包括：项目的进度是否按照项目计划执行，用户需求是否得到了用户的签字确认，软件需求是否正确的反映了用户的需求，是否将每一项用户需求都映射到软件需求；系统设计是否完全反映了软件需求；实现的软件是否正确的体现了系统设计；测试人员是否进行了较为彻底的和全面的测试；客户验收和交接清单是否完备；对于系统运行中出现的问题，维护人员是否记录了详细的维护记录；配置管理员是否按照配置管理计划建立了基线，是否严格控制变更过程，是否对配置库进行了维护。

10.4.2.2 配置管理小组职责

配置管理活动的目的是通过执行版本控制、变更控制、基线管理等规程，借助配置管理工具的使用，来保证整个生命周期过程产生的所有配置项的完整性、一致性和可追溯性。配置管理是对工作成果（阶段工作成果和产品成果、进展状

态成果)的一种有效保护形式，是反映项目及其工作产品的过去、现在、动态的资料和数据集中管理体现。

配置管理小组的主要职责包括：根据项目计划制定配置管理计划，建立配置库，为项目组人员分配配置库权限，创建需求、设计、开发、测试、交付阶段的基线。当纳入基线库的工作产品发生变更时，严格按照配置项变更控制过程执行变更，变更后建立新的基线。

10.4.2.3 测试小组职责

作为质量控制的主要手段，如同软件开发一样，测试在执行之前，测试小组制定软件测试计划、测试用例的编写和执行工作。

本项目中，测试可以分为如下几种类型：代码走查、单元测试、集成测试、系统测试。为了保证程序的质量，开发人员需要对同伴的代码进行代码走查，同时对自己编写的程序进行单元测试，确保程序编译、运行正确。

测试人员根据软件需求分析报告进行软件集成测试用例和系统测试用例的编写。对编写完成的测试用例提交项目组进行评审，同时质量保证人员对评审过程和工作产品进行监测。

测试人员根据测试计划和测试用例执行测试用例，并对发现的缺陷进行记录，只有这样才能确保项目组开发的软件产品满足用户需求。在完成集成测试之后，可以进行软件系统测试，系统测试包括对软件进行功能测试、性能测试、安全测试、压力测试。只有进行了系统测试软件测试才是完整的。系统测试在本项目中占有重要的地位，性能要求有可能改变软件的设计，为避免造成软件的后期返工，测试在性能上需要较大的侧重。

10.4.3 质量保证措施

通过质量管理责任的分配，通过如下几个方面来进行质量保证的实施过程：项目进度、需求分析、系统设计、系统实现、系统测试与系统维护。

燃油雾化机理研究和数值仿真模型构建项目简表

项目名称	燃油雾化机理研究和数值仿真模型构建		
申报单位	上海积鼎信息科技有限公司		
项目负责人	傅彦国	职务/职称	总经理
项目经费		项目周期	6 个月
总目标及应用方向 (300 字)	开展离心喷嘴雾化和横向来流直喷喷嘴雾化的雾化机理研究，分析不同来流条件对燃油雾化特性的影响规律，深入研究喷嘴雾化的过程和机理，进而开发构建基于 LES 框架的一次/二次雾化模型，提供雾化仿真模块。		
主要研究内容 (200 字)	研究离心喷嘴雾化和横向来流直喷喷嘴雾化的雾化机理，并基于 LES 框架开发集成一次/二次雾化模型，最终通过试验数据对雾化模型进行验证与优化。		
关键技术和创新点 (300 字)	<p>关键技术包括：1，雾化模型的代码模块化集成技术；2，一次雾化模块与二次雾化模块的耦合技术；3，雾化模块的整体健壮性；4，拉格朗日颗粒追踪技术。</p> <p>创新点：在燃油雾化机理探索和模型开发优化方面开展深入的研究，力求提升燃油雾化数值模拟预测精度，进一步推动先进发动机燃烧室的设计研发。基于 Code_Saturne 4.0 版本，针对直喷式与离心式两种喷嘴，构建空心锥结合 Rosin-Rammler 分布喷射模型、线性不稳定液膜雾化 LISA 模型、WAVE 模型以及 KH-RT 模型，将模型与航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真程序集成。开展雾化流场的数值模拟研究，根据两</p>		

	不同喷嘴的雾化宏观形态以及液滴微观粒径、速度等试验数据对雾化模型进行验证与优化。
主要指标 (200 字)	针对离心式喷嘴雾化模型，在 $20 < We < 700$ 、动量比 40–100 条件下，离心雾化算例获得的雾化锥角预测值与试验值偏差不大于 15%，油雾场 SMD 直径计算误差不大于 15%，液滴速度计算误差不大于 15%； 针对直喷式喷嘴雾化模型，在 $30 < We < 170$ 、动量比 10–30 条件下，直喷雾化算例获得的穿透深度预测值与试验值偏差不大于 15%，穿透轨迹预测值与试验值趋势一致，最大偏差不大于 20%，油雾场 SMD 直径计算误差不大于 15%。
预期成果 (200 字)	研究报告：离心式与直射式喷嘴射流雾化流场数值模拟研究报告各 1 份；雾化模型试验验证数据报告 1 份。 与航空发动机燃烧室两相燃烧数值仿真程序集成后的离心喷嘴和直射喷嘴雾化流场数值模拟软件模块源代码。 软件配套文档：燃油喷嘴雾化模型理论手册；用户使用指南；软件二次开发接口说明；软件测试分析报告。 验证算例数据：验证用离心和直射喷嘴模型验证用数据 1 套；燃油雾化模型验证算例 1 套。 燃油喷嘴试验件 2 套。
现有能力 (200 字)	本团队已就项目内容涉及的所有一次/二次雾化模型(RR 喷射模型、LISA 模型、KHRT 模型以及 WAVE 模型)展开了充分的

调研，并通过开源 CFD 代码对物理模型的数值实现有了充分的理解。此外，本团队对现有代码的欧拉-拉格朗日方法模块已经具备了框架性的认识与理解。