

工程领域 CFD应用实例分析

主编 李松 吕超



东北大学出版社
Northeastern University Press

工程领域 CFD 应用实例分析

主 编 李 松 吕 超

副主编 杨素霞



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 李 松 吕 超 2019

图书在版编目 (CIP) 数据

工程领域 CFD 应用实例分析 / 李松, 吕超主编. —
沈阳: 东北大学出版社, 2019. 11
ISBN 978-7-5517-2308-4

I. ①工… II. ①李… ②吕… III. ①计算流体力学
—工程实例 IV. ①O35②TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 274774 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83680176(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83680176(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 13

字 数: 302 千字

出版时间: 2019 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2019 年 11 月第 1 次印刷

策划编辑: 汪子珺

责任编辑: 石玉玲

责任校对: 木 子

封面设计: 潘正一

ISBN 978-7-5517-2308-4

定 价: 60.00 元

前 言

近半个多世纪以来, 计算机科学技术的飞速发展, 为计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 提供了技术和方法上的支持, 能够大大降低成本, 对复杂工况有良好的效果, 且 CFD 不像实地试验那样需要考虑实验仪器的精度和使用方法问题, 使其在工程研究等领域得到了广泛的应用。本书旨在通过呈现 CFD 在工程领域的实例, 帮助读者对 CFD 模拟有初步认识, 并经过练习来掌握模拟计算及分析方法。

本书全面系统地介绍了工程领域关于 CFD 模拟的各类实例。全书共分 6 章, 第 1 章阐述了 CFD 的基本理论、控制方程及求解策略; 第 2~3 章介绍了机械相关密封圈和装备相关反应器的模拟工作; 第 4~6 章介绍了汽车领域的 CFD 相关模拟, 包括车外部阻力分析, 车内部空调制冷效果分析, 新能源汽车锂离子电池的散热分析。既有普通工程机械领域的模拟研究, 又包括新能源汽车新领域的 CFD 模拟研究技术。

本书中既有主编六盘水师范学院李松和东北大学秦皇岛分校吕超近几年来对 CFD 在工程领域的技术的研究成果, 又有收集到的国内外相关文献资料的一些研究成果。本书中的很多内容反映了 CFD 在工程领域的应用现状。

在本书的编写及整理过程中, 副主编燕山大学杨素霞付出了辛勤的努力, 同时东北大学秦皇岛分校的陈展、董浩、杨延文、杨志云、夏天元也提供了宝贵的文献资料, 书中还引用了参考文献中的部分内容, 特向其作者表示深切的感谢。同时, 也为对本书编写过程中提供帮助的各界同人表示感谢。

由于 CFD 是不断发展、不断完善的技术, 随着时间的推移, 会有新的模型及方法出现。再者由于编者水平有限, 书中难免有疏漏或者不当之处, 敬请专家和读者批评指正。

编 者

2019 年 9 月

目 录

1	CFD 简介及控制方程	1
1.1	模拟理论基础	1
1.2	模拟工具介绍	1
1.2.1	前处理 GAMBIT 和 ICEM CFD	2
1.2.2	求解器 FLUENT 和 CFX	2
1.2.3	后处理 CFD-Post 和 Tecplot	2
1.3	控制方程	3
1.3.1	基本方程	3
1.3.2	湍流方程	4
1.3.3	曳力模型	4
1.3.4	相变方程	6
1.3.5	化学反应方程	6
1.4	求解策略	7
1.4.1	多相流模型	7
1.4.2	用户自定义函数 UDF	8
1.4.3	高阶离散格式求解	8
2	CFD 模拟机械密封圈	10
2.1	密封圈基础	10
2.1.1	机械密封特性	10
2.1.2	研究的目的是和意义	11
2.1.3	国内外相关理论研究现状	12
2.1.4	研究的主要内容和方法	12
2.2	直线槽式机械密封液膜场的数值模拟	13
2.2.1	基本假设	13
2.2.2	几何模型	14
2.2.3	网格的划分	15

2.2.4	指定边界类型	16
2.2.5	FLUENT 中对模型的求解	16
2.2.6	边界条件的设置	16
2.2.7	验证模型正确性	17
2.3	液膜流场计算分析	18
2.3.1	液膜压力分布及分析	18
2.3.2	液膜速度分布及分析	23
2.3.3	小结	27
2.4	直线槽式机械密封特性的研究分析	28
2.4.1	主要密封特性参数的计算	28
2.4.2	操作参数对密封性能的影响	29
2.4.3	小结	48
2.5	结论	49
3	CFD 模拟文丘里射流反应器	50
3.1	文丘里射流反应器基础	50
3.1.1	研究背景	50
3.1.2	国内外研究现状	51
3.1.3	研究方法	52
3.2	反应器内流场模拟	53
3.2.1	建立模型	53
3.2.2	Fluent 模拟仿真	54
3.2.3	计算域及边界条件	54
3.2.4	结果验证	55
3.2.5	反应器内模拟结果与讨论	55
3.3	条件优化	61
3.3.1	改变进口氧气温度	61
3.3.2	改变进口氧气速度	68
3.3.3	反应器结构优化	74
3.4	结论	80
4	CFD 模拟汽车外部阻力	82
4.1	汽车外部阻力基础	83
4.1.1	研究背景	83
4.1.2	国内外研究状况	85
4.1.3	研究目的、研究对象及概要	86

4.2	汽车建模与网格划分	87
4.2.1	几何模型建立	87
4.2.2	流场计算区域的确定	89
4.2.3	网格处理	90
4.3	研究模型数值仿真初始条件的选择	93
4.3.1	边界条件设置	93
4.3.2	仿真初始条件的选择	93
4.4	研究模型数值仿真分析及数据对比	95
4.4.1	仿真参数 nodes 和 elements 对比分析	95
4.4.2	阻力及阻力系数对比	95
4.4.3	升力及侧向力对比	97
4.4.4	压强对比	99
4.4.5	Turbulence 对比	112
4.4.6	Eddy viscosity 对比	123
4.4.7	Velocity 对比	127
4.4.8	Velocity streamline 对比	130
4.5	结 论	137
5	CFD 模拟汽车内部空调	139
5.1	汽车空调模拟基础	139
5.1.1	研究背景	139
5.1.2	国内外研究现状	140
5.1.3	本章主要研究内容	142
5.2	轿车传热特征	142
5.2.1	汽车乘坐空间的辐射分析	142
5.2.2	车室受热来源分析	144
5.2.3	小 结	146
5.3	车室模型的建立和参数设置	147
5.3.1	汽车三维模型的建立	147
5.3.2	网格划分	148
5.3.3	运行环境	148
5.3.4	参数和边界条件设置	149
5.3.5	小 结	151
5.4	送风温度、速度和空调位置对气流组织的影响	152
5.4.1	送风温度对汽车车室气流组织的影响	152
5.4.2	送风速度对汽车车室内气流组织的影响	156

5.4.3	进出风口位置对车室内气流组织的影响	160
5.4.4	小 结	163
5.5	车室内气流组织的评价	164
5.5.1	PMV-PPD 指标	164
5.5.2	空气分布特性指标	164
5.6	结 论	167
6	CFD 模拟新能源汽车电池	169
6.1	新能源汽车用锂离子基础	169
6.1.1	电动汽车用锂离子电池的研究背景	169
6.1.2	锂离子电池常用散热系统	170
6.1.3	国内外锂离子电池组散热研究现状	172
6.1.4	研究方法及内容	173
6.2	锂离子电池热特性	173
6.2.1	锂离子电池的生热机理	173
6.2.2	锂离子电池的传热机理	175
6.3	锂离子单体电池仿真分析	176
6.3.1	电池模型的建立	176
6.3.2	电池仿真分析	179
6.3.3	小 结	183
6.4	锂离子电池组液冷散热仿真分析	183
6.4.1	锂离子电池组模型	183
6.4.2	边界条件设置	184
6.4.3	仿真结果分析	186
6.4.4	结构优化	193
6.4.5	小 结	195
6.5	结 论	195
	参考文献	197

1 CFD 简介及控制方程

1.1 模拟理论基础

流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是应用计算机科学与流体力学的理论和方法, 利用超强的数值计算能力的计算机, 求解满足不同类型的传动、传质和传热规律的偏微分方程组的过程; 它是计算几何、数值分析、偏微分方程的数学理论及流体力学物理理论交叉融合形成的学科; 它被应用于航空航天、冶金机械、石油化工等工业工程领域, 更被广泛地应用在反应器设计方面; 它含有众多优化的数学物理模型, 关于定常流动和非定常流动、压缩流体和不可压缩流体、传热过程等物理问题及传质过程、化学反应过程等化学问题, 都能在 CFD 中找到合适的数值解法。

1.2 模拟工具介绍

CFD 模拟过程主要包括: 前处理、运算求解及后处理三部分, 如图 1-1 所示。

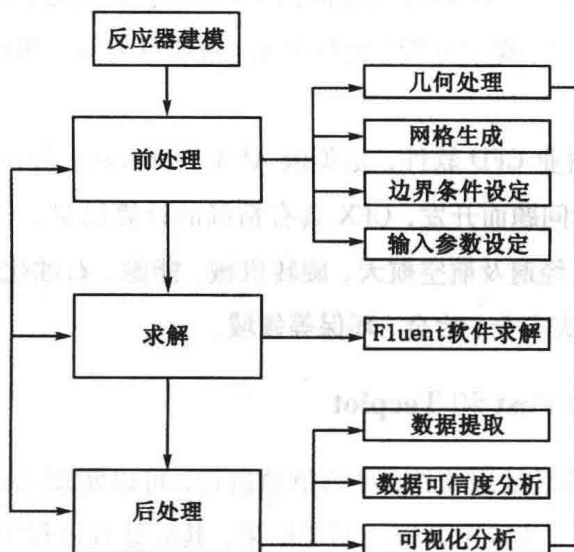


图 1-1 CFD 工作流程图

1.2.1 前处理 GAMBIT 和 ICEM CFD

在模拟过程中,大约有 80% 的时间都要用于网格划分工作,这是因为网格的质量会直接影响到后续工作中模拟计算的工作效率。下面介绍两种常用的网格生成软件。

GAMBIT 是专用的 CFD 前处理软件。具有超强的构建几何模拟及划分网格的能力。它可以直接建立复杂的几何模型,也可以和 CAD/CAE 系统的其他软件兼容,导入已有的几何模型,具有较高的几何建模效率;同时,它可以利用几何修正工具对已有的模型进行缝合、修补等多种操作,提高几何体的精度;并且它具有强大的网格划分能力,可以保证对复杂的几何区域划分出高质量的四面体网格、六面体网格或者混合网格。

ICEM CFD 具有强大的网格划分功能,针对简单的几何模拟,可以直接应用软件工具快速自动生成以六面体为主的网格;针对复杂的几何模型,它可以采用独特的网格“雕塑”技术进行多重拓扑块的结构和非结构化网格划分。除此之外,它还具备忽略细节特征设置,自动跨越几何缺陷及多余的细小特征,处理不完备的“烂模型”等优点,存在的缺点在于建模功能不够强大,需要从其他的建模软件中导入几何模型。

本书模拟过程中存优去劣,采用 GAMBIT 软件建立几何模型,采用 ICEM 软件进行网格划分,确保网格质量满足模拟要求。

1.2.2 求解器 FLUENT 和 CFX

FLUENT 是当前应用最为广泛的流体分析软件,从 FLUENT6.3 更新到了目前 ANSYS FLUENT 18.0,用户界面友好,可以用来模拟各种不同的复杂流动,包含各种不同的离散格式和数值方法,并且具备多重网格加速收敛技术,能实现最佳的求解精度。除准确模拟流体流动之外,FLUENT 软件还包括相变转换、传热过程、燃烧过程、化学反应过程、叶轮旋转等机械过程、噪声分析、燃料电池、液膜分离等高级模型,可以仿真模拟更为复杂的多相流过程。

CFX 是一种大型商业 CFD 软件,是英国 AEA Technology 公司为解决其在科技咨询服务中遇到的工业实际问题而开发,CFX 具有精确的计算结果、丰富的物理模型、强大的用户扩展性。CFX 已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域。

1.2.3 后处理 CFD-Post 和 Tecplot

CFD-Post 是 CFD 的后处理软件,可以单独运行,可以实现几何模型的透明化处理,可以绘制矢量图、云图、流线图及迹线图的结果,其后处理过程中设置染色模式工具操作方便,处理结果色彩渲染效果明显,并且可以快速生成报告。但在显示数据值的大小

方面的标注功能不够完善。

Tecplot 软件是一种数据分析及可视化处理软件,可以将其他软件导出的数据进行分析处理;可以直接读取 FLUENT 软件的 \square .cas 和 \square .dat 文件,也可以读取 Tecplot 格式文档。可以将抽象的数据处理成简单易懂的图形文件,可以是简单的 XY 图,也可以是复杂的 2-D 和 3-D 图,可以对图形进行剖面、切片、上色等处理,可以显示数据中包含的速度、压力、温度等分布云图,也可以描述等值线、流线等线图,并对图形中的数据进行标注,使得分析者对数据有更直接明了的认知,还可以针对多个的数据结果生成动画,使数据结果更立体生动。

本书利用 CFD-Post 处理几何模型的透明效果、网格划分等;Tecplot 处理反应器内的云图、矢量图,并标注数值大小。

1.3 控制方程

1.3.1 基本方程

多相流体的流动过程遵循基本的守恒定律:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律,而紊流状态的流体流动行为还要遵循湍流输运方程,将控制方程写成通用的方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1-1)$$

式中, ϕ 为通用变量, Γ 为扩散系数, S_{ϕ} 为源项,其取值见表 1-1。

表 1-1 直角坐标系下控制方程的一般形式

方程	ϕ	Γ	S_{ϕ}
连续方程	1	0	0
动量 方程	x 方向	μ	$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) + S_{Mx}$
	y 方向	μ	$-\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) + S_{My}$
	z 方向	μ	$-\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) + S_{Mz}$
能量方程	i	K	S_i

通用变量 ϕ 的意义为:

$$\phi \text{ 随时间的变化率} + \phi \text{ 由于对流的流出率} = \phi \text{ 由于扩散引起的增加率} + \phi \text{ 由于源项引起的增加率} \quad (1-2)$$

对微分方程(1-1)进行积分,则

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dV + \int_V \text{div} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dV = \int_V \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad}\phi) dV + \int_V S_\phi dV \quad (1-3)$$

利用奥式公式及高斯定律,考虑非稳态过程,需要在 Δt 进行积分

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V (\rho\phi) dV \right) dt + \iint_{\Delta t A} \vec{n} \cdot (\rho \vec{u} \phi) dAdt = \iint_{\Delta t A} \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad}\phi) dAdt + \iint_{\Delta t A} S_\phi dAdt \quad (1-4)$$

1.3.2 湍流方程

$k-\varepsilon$ 的双方程湍流模型应用最为广泛和成功。在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上,经过多名学者的改进形成了多种 $k-\varepsilon$ 模型:多尺度 $k-\varepsilon$ 模型、重整化群 $k-\varepsilon$ 模型及 Realizable $k-\varepsilon$ 模型等,本书模拟采用的是标准 $k-\varepsilon$ 模型,适用于边界层流动、三维边界层流动等现象,对于通用守恒方程形式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (1-5)$$

标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型的控制方程如下:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (1-6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \right) - \frac{c_2 \rho \varepsilon^2}{k} \quad (1-7)$$

其中, μ_t 是湍流黏度:

$$\varepsilon = C_D k^{3/2} / l \quad (1-8)$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1-9)$$

各个参数取值: $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.3.3 曳力模型

在两相流体系中,在不考虑两相间的质量及能量传递过程,遵循质量及动量守恒定律,各相的局部动量守恒方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_p \vec{v}_q) = \\ & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_{q+} + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n [K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + m_{pq} \vec{v}_{pq} - m_{qp} \vec{v}_{pq} + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q})] \end{aligned} \quad (1-10)$$

上式中, F_{pq} 是两相间的动量交换, 表征着两相间各种动量传递机理(包括曳力、虚拟质量力及升力等)的线性组合, 因为虚拟质量力和升力相比曳力差别较小, 一般忽略, 只考虑曳力的影响。

$$F_{ci, drag} = \frac{3\alpha_c\alpha_d C_D}{4d_d} \left| \vec{u}_d - \vec{u}_c \right| (u_{di} - u_{ci}) \quad (1-11)$$

$$F_{di, drag} = -F_{ci, drag} \quad (1-12)$$

K_{pq} 是两相间的动量交换系数。在气-固两相流体系中

$$K_{gs} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (1-13)$$

在不同的交换系数模型中 f 取值不同, “颗粒松弛时间” τ_s 可以表示为:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_g} \quad (1-14)$$

其中, d_s 是固相颗粒直径。曳力函数为 C_D , 它受雷诺数 Re_s 影响。

在 Syamlal-O'brien 模型中

$$f = \frac{C_D Re_s \alpha_g}{24v_{r,s}} \quad (1-15)$$

曳力函数 C_D 为

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s/v_{r,s}}} \right)^2 \quad (1-16)$$

这个模型是基于测量流化床或沉积床的颗粒的沉降速度得到的, 其中, Re_s 是相对雷诺系数, 该模型是由颗粒沉降过程中的速度得到的。

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (1-17)$$

气-固相间的动量交换系数为

$$K_{sg} = \frac{3\alpha_s\alpha_g\rho_g}{4v_{r,s}^2 d_s} C_D \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (1-18)$$

$v_{r,s}$ 为固体相的自由沉降速度:

$$v_{r,s} = 0.5(A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s(2B - A) + A^2}) \quad (1-19)$$

其中: $A = \alpha_g^{4.14}$, 当 $\alpha_g \leq 0.85$ 时, $B = 0.8\alpha_g^{1.28}$, 当 $\alpha_g > 0.85$ 时, $B = 0.8\alpha_g^{2.65}$ 。

Wen-Yu 模型中气-固交换系数表示为:

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{d_s} |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \alpha_g^{-2.65} \quad (1-20)$$

其中:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} [1 + 0.15 (\alpha_g Re_s)^{0.687}] \quad (1-21)$$

此模型适合于稀相体系。

1.3.4 相变方程

涉及相变的控制方程中动量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{m,k} \vec{v}_{m,k} \right) \quad (1-22)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (1-23)$$

$$\vec{v}_{m,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (1-24)$$

能量方程：

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (1-25)$$

$$E_k = h_k - \frac{P}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (1-26)$$

对于可压缩相：

$$E_k = h_k \quad (1-27)$$

对于不可压缩相， E_k 为第 k 相的潜热， k_{eff} 为传热系数。

1.3.5 化学反应方程

涉及异相化学反应的物质传输方程：

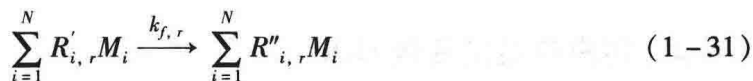
$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (1-28)$$

即 N 种物质质量分数之和 $\sum_{i=1}^N Y_i = 1$ 与 $N-1$ 个化学物质守恒，其中 Y_i 表示第 i 种物质的质量分数， R_i 代表物质 i 的化学反应净产生速率， S_i 代表物质 i 的离散相及用户自定义的源项导致的额外产生速率， \bar{J}_i 代表物质 i 的扩散通量，由浓度梯度产生。

$$\bar{J}_i = - \left(-\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \nabla Y_i \quad (1-29)$$

其中， $D_{i,m}$ 代表化合物中第 i 组分的扩散系数， μ_i 、 Sc_i 分别为湍流黏度和施密特数。

$$R_i = M_{w,j} \sum_{i=1}^{N_R} \bar{R}_{i,r} \quad (1-30)$$



$$\eta = AT^{\beta_r} e^{-E_a/RT} \quad (1-32)$$

其中, $M_{w,j}$ 为第 i 种物质的相对分子质量; $\bar{R}_{i,r}$ 为第 i 种物质在第 r 个反应中产生或分解速率; M_i 为第 i 种物质符号; $R'_{i,r}$ 为反应 r 中反应物 i 的化学计量数; $R''_{i,r}$ 为反应 r 中生成物 i 的化学计量数; η 为反应的速率常数; A 反应的指前因子; β_r 反应 r 的温度指数; E_a 为反应的活化能, kJ/mol ; R 为通用气体常数, $\text{kJ/mol} \cdot \text{K}$ 。

1.4 求解策略

1.4.1 多相流模型

多相流模型分为 Euler-Lagrange 模型和 Euler-Euler 模型。

Euler-Lagrange 模型是把流体相看成连续相, 求解 Navier-Stokes 方程, 颗粒、气泡或是液滴等离散相用流场中的大量粒子流动计算得到, 要求离散相为第二相, 并且体积分数小于 10%, 可以用来模拟雾化、煤粉燃烧等现象。

Euler-Euler 模型是把不同的相看成连续介质, 每一相都采用 Eulerian 坐标描述; 定义相体积分数概念, 各相的体积分数之和等于 1; 可以用来模拟弥散相浓度比较高的现象。

VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的界面跟踪方法, 可以用来模拟一种或多种不相溶流体的交界面问题, 例如分层流、射流破碎、晃动、自由表面的流动、液体中的大气泡的流动等分界现象。

混合模型 (Mixture 模型) 可用于模拟两相流或多相流的流动行为, 混合模型是求解混合相的连续性方程、动量方程、能量方程、第二相体积分数的过程, 可以用来模拟气泡流、旋风分离等两相或多相具有不同速度的现象。

Eulerian 模型可以用来模拟多相流动及相间的互相作用过程, 每一相都用 Eulerian 处理, 对每一相都求解动量及连续性方程, 可以用来模拟气泡柱、颗粒悬浮和流化床等现象。

对于同时包含多种多相流的情况, 要选择合适的流动模型。Mixture 模型和 Eulerian 模型可以用来模拟各相之间的混合及分离过程, 如果分散相分布范围较小, 可以选择 Eulerian 模型; 如果曳力模型明确, 可以选用 Eulerian 模型; 如果要求计算精度较高, 可以选用 Eulerian 模型。

1.4.2 用户自定义函数 UDF

用户自定义函数(user-defined function, UDF), 是用户应用 C 语言编写的程序, 它可以提高 FLUENT 处理复杂模型的能力, 扩展 FLUENT 的应用功能; 如果模拟的模型或者应用的范围较为复杂, 需要借助 C 程序, 结合用户自定义函数 UDF 来实现求解运算; 通常用 DEFINE 宏来定义: 比如可以自定义边界条件、自定义材料的物性、自定义表面和体积的反应速率、定义组分输运方程中源项等。

1.4.3 高阶离散格式求解

FLUENT 求解过程包括分离式解法与耦合式解法两种方法。分离式解法分为涡量-流函数法、涡量-速度法、压力修正法、求解压力泊松方程法、人为压缩法; 耦合式解法分为所有变量全场联立求解、部分变量全场联立求解、局部地区所有变量全场联立求解。

压强速度耦合方式的算法分为 SIMPLE 算法、SIMPLEC 算法和 PISO 算法。SIMPLE 算法是求解湍流的时均方程, 可以用于求解可压缩及不可压缩流体。

离散格式就是求解离散方程的插值方法, 应用最为广泛的是一阶离散格式, 具有一阶精度, 它可以获得物理上可接受的解, 但在一定条件下, 会发生严重的假扩散现象, 需要随计算网格进行加密; 中心差分格式是界面上物理量采用线性插值方式来进行计算, 具有二阶精度, 在不发生震荡的参数范围内可获得准确率较高的结果; 二阶迎风格式是空间离散度的高阶离散格式, 具有二阶精度, 充分考虑了曲线曲率的影响, 其方程包含了相邻节点及附近其他节点的物理量, 模拟过程中通常采用二阶迎风格式; QUICK 格式是“对流项的二次迎风插值”, 可以减少假扩散误差, 对流项具有三阶精度, 扩散项具有二阶精度, 应用较为广泛, 常用于三维问题的六面体或二维问题的四边形网格, 计算量较大。

下面详细介绍二阶迎风格式求解方法, 三维对流扩散问题的控制微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varphi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S \quad (1-33)$$

采用图 1-2 所示的离散网格系统, 对方程式(1-33)在控制容积内积分, 有

$$\begin{aligned} & \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varphi) dV \\ & = \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) dV + \int_{\Delta V} S dV \end{aligned} \quad (1-34)$$

针对内部节点(P点)研究其控制方程的离散形式, W 、 E 分别为 P 点左右侧邻近节

点; N 、 S 分别为 P 节点前后侧邻近节点; T 、 B 分别为 P 节点上下侧邻近节点, 由图 1-2 可知, 对于结构化网格, 控制容积的边界面积, 有 $A_w = A_e = \Delta y \Delta z$ 。

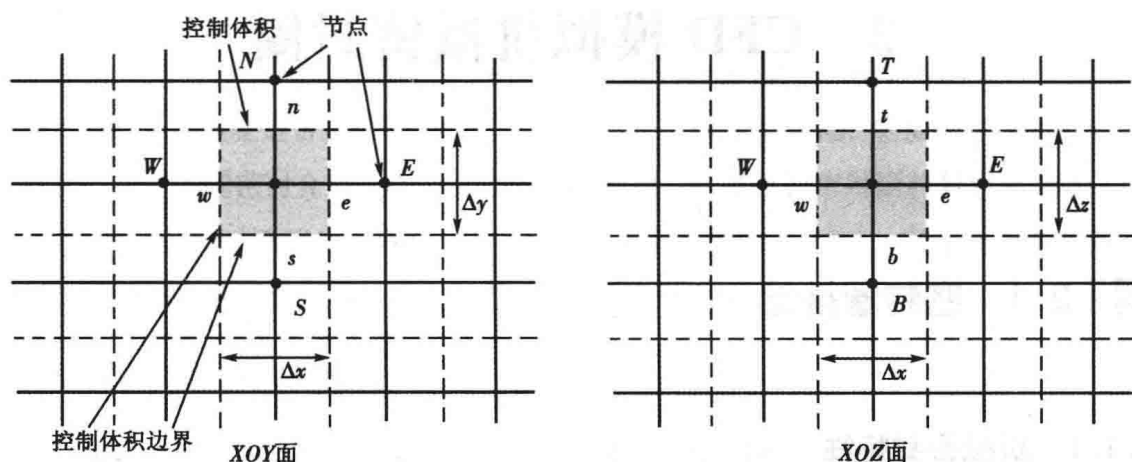


图 1-2 三维问题的有限体积法结构化网格

有限体积法统一的离散格式为

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_{ww} \phi_{ww} + a_e \phi_e + a_{ee} \phi_{ee} \quad (1-35)$$

对于二阶迎风格式

$$a_p = a_w + a_{ww} + a_e + a_{ee} + (F_e - F_w) \quad (1-36)$$

其中:

$$F_e = (\rho u)_e A_e, F_w = (\rho u)_w A_w \quad (1-37)$$

$$D_e = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e / (\phi_e - \phi_p), D_w = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w / (\phi_p - \phi_w) \quad (1-38)$$

$$\begin{cases} a_w = D_w + \frac{3}{2} \alpha F_e \\ a_{ww} = -\frac{1}{2} \alpha F_w \end{cases} \quad (1-39)$$

$$\begin{cases} a_e = D_e - \frac{3}{2} (1 - \alpha) F_e - \frac{1}{2} (1 - \alpha) F_w \\ a_{ee} = \frac{1}{2} (1 - \alpha) F_e \end{cases} \quad (1-40)$$