



清华社“视频大讲堂”大系

CAD/CAM/CAE技术视频大讲堂

ANSYS FLUENT 中文版流场分析 从入门到精通

曾建邦 单丰武 编著

清华大学出版社
北京

前言

Preface



computational fluid dynamics (简称 CFD, 计算流体动力学), 用离散化的数值方法和计算机对流体无黏绕流和黏性流动进行数值模拟和分析。无黏绕流包括低速流、跨声速流、超声速流等; 黏性流动包括湍流、边界层流动等。计算流体力学是计算力学的一个分支, 是为弥补理论分析方法的不足, 于 20 世纪 60 年代发展起来的, 并相应地形成了各种数值解法, 主要有限差分法和有限元法。流体力学运动偏微分方程有椭圆型、抛物型、双曲型和混合型等, 所以计算流体力学很大程度上就是针对不同性质的偏微分方程采用和发展相应的数值解法。

实验研究、理论分析方法和数值模拟是研究流体运动规律的 3 种基本方法, 它们的发展是相互依赖、相互促进的。计算流体力学的兴起促进了流体力学的发展, 改变了流体力学研究工作的状况, 很多原来认为很难解决的问题, 如超声速、高超声速钝体绕流、分离流以及湍流问题等, 现在对这些问题的分析研究都有了不同程度的发展, 而且将为流体力学研究提供新的发展前景。

计算流体力学的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展, 为简化流动模型的创建提供了更多的依据, 使很多分析方法得到了发展和完善。然而, 更重要的是计算流体力学采用它独有的、新的研究方法——数值模拟方法, 研究流体运动的基本物理特性, 其特点如下。

(1) 给出流体运动区域内的离散解, 而不是解析解, 这区别于一般理论分析方法。

(2) 它的发展与计算机技术的发展直接相关。这是因为模拟的流体运动的复杂程度、解决问题的广度, 都与计算机运算速度、内存等直接相关。

(3) 若物理问题的数学提法(包括数学方程及其相应的边界条件)是正确的, 则可在较广泛的流动参数(如马赫数、雷诺数、模型尺度等)范围内研究流体力学问题, 且能给出流场参数的定量结果。

以上这些是风洞实验和理论分析难以做到的, 因此要创建正确的数学方程还必须与实验研究相结合。另外, 严格的稳定性分析、误差估计和收敛性理论的发展还跟不上数值模拟的发展。所以在计算流体力学中, 仍必须依靠一些较简单的、线性化的、与原问题有密切关系的模型方程的严格数学分析, 给出所求解问题数值解的理论依据。依靠数值实验、地面实验和物理特性分析, 验证计算方法的可靠性, 从而进一步改进计算方法。

Fluent 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件包, 在美国的市场占有率为 60%。与流体、热传递和化学反应等有关的行业均可使用它。它具有丰富的物理模型、先进的数值计算方法和强大的前后处理功能, 在航空航天、汽车设计、石油、天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。例如, 在石油、天然气工业上的应用就包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散与聚积、多相流、管道流动等。另外, 通过 Fluent 提供的用户自定义函数可以改进和完善模型, 从而处理更加个性化的问题。

一、编写目的

鉴于 Fluent 的强大功能, 我们力图编写一本着重介绍 Fluent 实际工程应用的书籍。不求事无巨细



地将 Fluent 知识点全面讲解清楚，而是根据工程需要，将 Fluent 大体知识脉络作为线索，以实例作为“抓手”，帮助读者掌握利用 Fluent 进行工程分析的基本技能和技巧。



Note

二、本书内容及特点

本书全面介绍了通过 Fluent 中文版进行流场分析的各种功能和基本操作方法。全书共 13 章，第 1~2 章介绍流体力学基础和流体流动分析软件，第 3~6 章介绍 DesignModeler、Meshing、Fluent 软件的使用操作，第 7~13 章结合实例介绍 Fluent 中常用的计算模型及其在求解流体和传热等工程问题中的方法。

三、本书的配套资源

本书提供了极为丰富的学习配套资源，可以帮助读者在最短的时间内学会并掌握书中介绍的技术。读者可扫描封底的“文泉云盘”二维码，以获取下载方式。

1. 15 集同步教学视频

针对本书实例，专门制作了 15 集配套教学视频，读者可像看电影一样轻松愉悦地学习本书内容，然后对照课本加以实践和练习，可以大大提高学习效率。

2. 15 个综合实战案例精讲视频，长达 200 分钟

为了帮助读者拓展视野，电子资源中额外赠送了 15 个有限元分析综合实战案例（涵盖 Ansys、Patran 和 Nastran）及其配套的源文件和精讲课堂视频，学习时长达 200 分钟。

3. 全书实例的源文件和素材

本书附带了很多实例，光盘中包含实例和练习实例的源文件和素材，读者可以安装 Fluent 2022 软件，打开并使用。

四、关于本书的服务

1. Fluent 安装软件的获取

按照本书的实例进行操作练习，需要事先在计算机上安装 Fluent 软件。读者可以登录 Ansys 官方网站购买 Fluent 安装软件，或者使用其试用版。

2. 关于本书的技术问题或有关本书信息的发布

读者如果遇到有关本书的技术问题，可以扫描封底“文泉云盘”二维码查看是否已发布相关勘误/解疑文档。如果没有，可在页面下方找到加群方式联系我们，我们会尽快回复。

3. 关于手机在线学习

读者可扫描书后的刮刮卡（需刮开涂层）二维码，以获取书中二维码的读取权限，再扫描书中二维码，可在手机中观看对应的教学视频，以充分利用碎片化时间，取得较好的学习效果。需要强调的是，书中给出的是实例的重点步骤，详细操作过程还需读者通过视频来学习并领会。

五、关于作者

本书由华东交通大学的曾建邦和同济大学的单丰武两位老师编写，其中曾建邦执笔编写了第 1~8 章，单丰武执笔编写了第 9~13 章。本书在编写过程中虽力求尽善尽美，但由于作者能力有限，书中难免存在不妥之处，请广大读者提出建议或意见。



文泉云盘



六、致谢

在本书的写作过程中，编辑贾小红和艾子琪女士给予了很大的帮助和支持，提出了很多中肯的建议，在此表示感谢。同时，还要感谢清华大学出版社的所有编辑人员为本书的出版所付出的辛勤劳动。本书的成功出版是大家共同努力的结果，谢谢所有给予支持和帮助的人们。

编者



Note

目 录

Contents



第 1 章 流体力学基础	1	2.3.2 Fluent 软件的启动	26
1.1 流体力学基本概念	2	2.4 Fluent 的功能特点和分析过程	29
1.1.1 连续介质的模型	2	2.4.1 数值算法	29
1.1.2 流体的基本性质	2	2.4.2 物理模型	30
1.1.3 作用在流体上的力	3	2.4.3 Fluent 的应用	33
1.1.4 研究流体运动方法	4	2.4.4 Fluent 的分析过程	33
1.2 流体运动的基本概念	5	第 3 章 创建几何模型	35
1.2.1 层流流动与紊流流动	5	3.1 启动 DesignModeler	36
1.2.2 有旋流动与无旋流动	5	3.2 DesignModeler 图形界面	37
1.2.3 声速与马赫数	6	3.2.1 图形界面介绍	37
1.2.4 膨胀波与激波	6	3.2.2 菜单栏	38
1.3 附面层理论	7	3.2.3 工具栏	39
1.3.1 附面层概念及附面层厚度	7	3.2.4 信息栏	39
1.3.2 附面层微分方程	8	3.2.5 鼠标操作	40
1.4 流体运动及换热的多维方程组	8	3.2.6 选择过滤器	40
1.4.1 物质导数	8	3.2.7 单选	40
1.4.2 不同形式的 N-S 方程	9	3.2.8 框选	41
1.4.3 能量方程与导热方程	11	3.3 绘制草图	41
1.5 湍流模型	11	3.3.1 设置单位	41
1.6 计算网格与边界条件	14	3.3.2 绘图平面	42
1.6.1 计算网格	14	3.3.3 草图工具箱	43
1.6.2 边界条件	14	3.4 三维建模	46
第 2 章 流体流动分析软件概述	16	3.4.1 挤出特征	46
2.1 CFD 软件简介	17	3.4.2 旋转特征	49
2.1.1 CFD 软件结构	17	3.4.3 扫掠特征	50
2.1.2 CFD 基本模型	18	3.4.4 蒙皮/放样	51
2.1.3 常用的 CFD 商用软件	21	3.4.5 薄/表面	51
2.2 Fluent 软件介绍	23	3.4.6 固定半径圆角	52
2.2.1 Fluent 的软件结构	23	3.4.7 变量半径圆角	53
2.2.2 Fluent 的功能及特点	24	3.4.8 顶点圆角	53
2.3 Fluent 的系统要求和启动	26	3.4.9 倒角	54
2.3.1 系统要求	26	3.4.10 模式	54



Note

3.4.11	几何体转换	55	4.5.1	生成网格	86
3.4.12	布尔运算	60	4.5.2	截面	86
3.4.13	切片	61	4.5.3	命名选择	88
3.4.14	单一几何体	63	4.6	网格划分方法	88
3.5	概念建模	63	4.6.1	自动划分方法	88
3.5.1	来自点的线	64	4.6.2	四面体	89
3.5.2	草图线	64	4.6.3	扫掠	91
3.5.3	边线	64	4.6.4	多区域	91
3.5.4	曲线	65	第 5 章	Fluent 软件的操作使用	93
3.5.5	分割边	65	5.1	Fluent 的操作界面	94
3.5.6	边表面	66	5.1.1	Fluent 启动界面	94
3.5.7	草图表面	67	5.1.2	Fluent 图形用户界面	94
3.5.8	面表面	67	5.2	Fluent 对网格的基本操作	97
3.6	横截面	68	5.2.1	导入和检查网格	97
3.6.1	创建横截面	68	5.2.2	显示和修改网格	100
3.6.2	将横截面赋给线体	68	5.3	选择 Fluent 求解器及运行环境	105
3.7	冻结和解冻	69	5.3.1	Fluent 求解器的比较与选择	105
第 4 章	划分网格	70	5.3.2	Fluent 计算模式的选择	106
4.1	网格生成技术	71	5.3.3	Fluent 运行环境的选择	106
4.1.1	常用的网格单元	71	5.3.4	Fluent 的基本物理模型	107
4.1.2	网格生成方法分类	71	5.3.5	Fluent 的材料定义	112
4.1.3	网格类型的选择	73	5.4	设置 Fluent 的边界条件	113
4.1.4	网格质量	74	5.5	设置 Fluent 的求解参数	125
4.2	Meshing 网格划分模块	75	第 6 章	Fluent 高级应用	127
4.2.1	网格划分步骤	75	6.1	UDF 概述	128
4.2.2	分析类型	75	6.1.1	UDF 基础知识	128
4.3	全局网格控制	76	6.1.2	UDF 能够解决的问题	128
4.3.1	全局单元尺寸	76	6.1.3	UDF 宏	128
4.3.2	全局尺寸调整	77	6.1.4	UDF 的预定义函数	130
4.3.3	质量	78	6.1.5	UDF 的编写	134
4.3.4	高级尺寸功能	79	6.2	UDS 基础知识	135
4.4	局部网格控制	80	6.3	并行计算	137
4.4.1	局部尺寸调整	80	6.3.1	开启并行求解器	137
4.4.2	接触尺寸	82	6.3.2	使用并行网络工作平台	137
4.4.3	加密	82	6.3.3	分割网格	138
4.4.4	面网格剖分	83	6.3.4	检测并提高并行性能	141
4.4.5	匹配控制	84	第 7 章	二维流动和传热的数值模拟	143
4.4.6	收缩控制	85	<u>(视频讲解: 20 分钟)</u>		
4.4.7	膨胀	85	7.1	三角形腔体内层流流动	144
4.5	网格工具	86			



7.1.1 创建几何模型.....	144	9.3.2 划分网格及边界命名.....	194
7.1.2 划分网格及边界命名.....	145	9.3.3 分析设置.....	196
7.1.3 分析设置.....	146	9.3.4 求解设置.....	201
7.1.4 求解设置.....	148	9.3.5 求解.....	203
7.1.5 求解.....	150	9.3.6 查看求解结果.....	204
7.1.6 查看求解结果.....	150		
7.2 二维三通管内流体的流动分析.....	151	第 10 章 湍流分析.....	206
7.2.1 导入 Mesh 文件.....	152	(<u>视频讲解: 18 分钟</u>)	
7.2.2 计算模型的设定.....	152	10.1 湍流模型概述.....	207
7.2.3 求解设置.....	156	10.1.1 单方程 (spalart-allmaras)	
7.2.4 查看求解结果.....	157	模型.....	207
第 8 章 三维流动和传热的数值模拟.....	161	10.1.2 标准 $k-\epsilon$ 模型.....	208
(<u>视频讲解: 26 分钟</u>)		10.1.3 重整化群 (RNG) $k-\epsilon$ 模型.....	208
8.1 混合器流动和传热的数值模拟.....	162	10.1.4 可实现 $k-\epsilon$ 模型.....	209
8.1.1 导入 Mesh 文件.....	162	10.1.5 k-epsilon (2 eqn) 模型.....	210
8.1.2 计算模型的设定.....	162	10.1.6 k-omega (2 eqn) 模型.....	211
8.1.3 求解设置.....	168	10.1.7 转换 k-kl-omega (3 eqn)	
8.1.4 后处理.....	169	模型.....	211
8.2 三维流-固耦合散热模拟.....	175	10.1.8 转换 SST (4 eqn) 模型.....	211
8.2.1 导入 Mesh 文件.....	175	10.1.9 雷诺应力 (RSM-5 eqn) 模型.....	212
8.2.2 计算模型的设定.....	175	10.1.10 尺度自适应 (SAS) 模型.....	213
8.2.3 求解设置.....	180	10.1.11 分离涡模拟 (DES) 模型.....	213
8.2.4 后处理.....	180	10.1.12 大涡模拟.....	213
第 9 章 多相流模型.....	184	10.2 混合弯头中的流体流动和传热.....	213
(<u>视频讲解: 42 分钟</u>)		10.2.1 创建几何模型.....	214
9.1 Fluent 中的多相流模型.....	185	10.2.2 划分网格及边界命名.....	219
9.1.1 VOF 模型.....	185	10.2.3 分析设置.....	222
9.1.2 Mixture 模型.....	186	10.2.4 求解设置.....	227
9.1.3 Eulerian 模型.....	186	10.2.5 求解.....	230
9.2 水油混合物 T 形管流动模拟		10.2.6 查看求解结果.....	231
实例.....	187	第 11 章 可动区域中流动问题的模拟.....	232
9.2.1 导入 Mesh 文件.....	187	(<u>视频讲解: 26 分钟</u>)	
9.2.2 计算模型的设定.....	187	11.1 无旋转坐标系的三维旋转流动.....	233
9.2.3 求解设置.....	189	11.1.1 导入 Mesh 文件.....	233
9.2.4 查看求解结果.....	189	11.1.2 计算模型的设定过程.....	233
9.2.5 欧拉模型求解设置.....	190	11.1.3 模型初始化.....	239
9.2.6 查看欧拉模型求解结果.....	191	11.1.4 迭代计算.....	239
9.3 VOF 模型倒酒实例.....	191	11.1.5 Fluent 自带后处理.....	240
9.3.1 创建几何模型.....	192	11.2 单一旋转坐标系中三维旋转	
		流动.....	242





Note

11.2.1	利用 Fluent 导入 Case 文件	242	12.3.4	查看求解结果	269
11.2.2	$\Omega=\omega/2$ 涡动模型的修改和 计算	243	12.4	动网格小球落水模拟	270
11.2.3	$\Omega=\omega$ 涡动模型的修改和计算	246	12.4.1	创建几何模型	270
11.3	滑移网格实例分析——十字搅拌器 流场模拟	248	12.4.2	划分网格及边界命名	271
11.3.1	导入 Mesh 文件	248	12.4.3	分析设置	272
11.3.2	计算模型的设定	249	12.4.4	求解设置	278
11.3.3	求解设置	251	12.4.5	求解	279
11.3.4	后处理	251	12.4.6	查看求解结果	279
第 12 章	动网格模型的模拟	253	第 13 章	物质运输和有限速率化学反应 模型模拟	282
	(视频讲解: 47 分钟)			(视频讲解: 30 分钟)	
12.1	动网格模型概述	254	13.1	有限速率化学反应	283
12.2	用动网格方法模拟隧道中两车 相对行驶的流场	255	13.1.1	化学反应模型概述	283
12.2.1	创建几何模型	255	13.1.2	有限速率化学反应的设置	286
12.2.2	划分网格及边界命名	256	13.2	预混燃烧模型实例——乙炔-氧 燃烧	289
12.2.3	分析设置	258	13.2.1	创建几何模型	289
12.2.4	模型初始化	261	13.2.2	划分网格及边界命名	290
12.2.5	迭代计算	262	13.2.3	分析设置	291
12.2.6	Fluent 自带后处理	263	13.2.4	求解设置	295
12.3	三维活塞在汽缸中的运动模拟 实例	264	13.2.5	求解	296
12.3.1	导入 Mesh 文件	264	13.2.6	查看求解结果	297
12.3.2	计算模型的设定	265	13.3	乙烷燃烧模拟实例	299
12.3.3	求解设置	268	13.3.1	利用 Fluent 求解器求解	299
			13.3.2	采用变比热容的解法	308
			13.3.3	后处理	310

第1章

流体力学基础

流体力学是力学的一个重要分支，也是理论性很强的一门学科，涉及很多复杂的理论和公式。本章重点介绍流体力学和流体运动的基本概念，以及流体流动和传热的基本控制方程、边界层的基本理论。通过本章的学习，读者可以掌握流体流动和传热的基本控制方程，为学习后面的软件操作打下理论基础。



Note

1.1 流体力学基本概念

本节简要介绍了流体的连续介质模型、基本性质，并对作用在流体上的力以及流体运动的方法进行了研究。

1.1.1 连续介质的模型

气体与液体都属于流体。从微观角度讲，无论是气体还是液体，分子间都存在间隙，同时，由于分子的随机运动，不但导致流体的质量在空间上的分布是不连续的，而且任意空间点上流体物理量相对时间也是不连续的。从宏观的角度讲，流体的结构和运动又表现出明显的连续性与确定性，流体力学研究的是流体的宏观运动。在流体力学中，用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。1753年，欧拉首先采用连续介质作为宏观流体模型，将流体看作由无限多流体质点组成的稠密而无间隙的连续介质，这个模型被称为连续介质模型。

流体的密度定义为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中， ρ 为流体密度； m 为流体质量； V 为质量 m 的流体所占的体积。对于非均质流体，流体中任一点的密度定义为

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow \Delta v_0} \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad (1-2)$$

式中， Δv_0 是设想的一个最小体积，在 Δv_0 内包含足够多的分子，使密度的统计平均值 ($\frac{\Delta m}{\Delta v}$) 有确切的意义。 Δv_0 就是流体质点的体积，所以连续介质中某一点的流体密度实质上是流体质点的密度。同样，连续介质中某一点的流体速度，是指在某瞬时质心在该点的流体质点的质心的速度。不仅如此，对空间任意点上的流体物理量都是指位于该点上的流体质点的物理量。

1.1.2 流体的基本性质

1. 流体压缩性

流体体积随作用在其上的压强的增加而减小的特性称为流体的压缩性，通常用压缩系数 β 来度量，它的具体定义为：在一定温度下，增加单位压强时流体体积的相对缩小量，即

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-3)$$

纯液体的压缩性很差，通常情况下可以认为液体的体积和密度是不变的。对于气体，其密度随压强的变化和热力过程有关的。

2. 流体的膨胀性

流体体积随温度的升高而增大的特性称为流体的膨胀性，通常用膨胀系数 α 来度量，它定义为：在压强不变的情况下，温度上升 1 摄氏度时流体体积的相对增加量，即

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-4)$$



一般来说,液体的膨胀系数都很小。通常情况下,在工程中不考虑它们的膨胀性。

3. 流体的黏性

在做相对运动的两流体层的接触面上存在一对等值且反向的力,阻碍两相邻流体层的相对运动,流体的这种性质叫作流体的黏性,由黏性产生的作用力叫作黏性阻力或内摩擦力。黏性阻力产生的物理原因是存在分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力。根据牛顿内摩擦定律,两层流体间的切应力表达式为

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad (1-5)$$

式中, τ 为切应力; μ 为动力黏性系数,与流体种类和温度有关; $\frac{dV}{dy}$ 为垂直于两层流体接触面上的速度梯度。因此,把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。

黏性系数受温度的影响很大。当温度升高时,液体的黏性系数减小,黏性下降,而气体的黏性系数增大,黏性增加。在压强不是很高的情况下,黏性系数受压强的影响很小,只有当压强很高(例如,几十兆帕)时,需要考虑压强对黏性系数的影响。

4. 流体的导热性

当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时,温度高的地方与温度低的地方之间会发生热量交换。热量传递有热传导、热对流、热辐射3种形式。当流体在管内高速流动时,在紧贴壁面的位置会形成层流底层,液体在该处相对壁面的流速很低,几乎为零,所以与壁面进行的主要是热传导,而层流以外的区域的热量传递形式主要是热对流。

单位时间内通过单位面积由热传导所传递的热量可按傅立叶导热定律确定,表达式为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-6)$$

式中, n 是面积的法线方向; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 是沿 n 方向的温度梯度; λ 是导热系数,负号表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

通常情况下,流体与固体壁面间的对流换热量可表达为

$$q = h \cdot (T_1 - T_2) \quad (1-7)$$

式中, h 为对流换热系数,与流体的物性、流动状态等因素有关,主要是由试验数据得出的经验公式来确定的。

1.1.3 作用在流体上的力

作用在流体上的力可分为质量力与表面力两类。所谓质量力(或称体积力)是指作用在体积 V 内每一液体质量(或体积)上的非接触力,其大小与流体质量成正比。重力、惯性力、电磁力都属于质量力。所谓表面力是指作用在所取流体表面 S 上的力,它是由与这块流体相接触的流体或物体的直接作用而产生的。

在流体表面围绕 M 点选取一微元面积,作用在其上的表面力用 ΔF_s 表示,将 ΔF_s 分解为垂直于微元表面的法向力 ΔF_n 和平行于微元表面的切向力 ΔF_t 。在静止流体或运动的理想流体中,表面力只有垂直于表面上的法向力 ΔF_n ,这时,作用在 M 点周围单位面积上的法向力就为 M 点上的流体静压强,即



Note



Note

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow \Delta S_0} \frac{\Delta \vec{F}_n}{\Delta S} \quad (1-8)$$

式中， ΔS_0 是和流体质点的体积具有相比拟尺度的微小面积。静压强又常称为静压。

流体静压强具有如下两个重要特性。

- (1) 流体静压强的方向总是和作用面相垂直，并且指向作用面。
- (2) 在静止流体或运动理想流体中，某一点静压强的大小各向相等，与所取作用面的方向无关。

1.1.4 研究流体运动方法

在研究流体运动时有两种不同的方法：一种是从分析流体各个质点的运动入手，来研究整个流体的运动；另一种是从分析流体所占据的空间中各固定点处的流体运动入手，来研究整个流体的运动。

在任意空间点上，流体质点的全部流动参数，例如，速度、压强、密度等都不随时间而改变，这种流动称为定常流动；若流体质点的全部或部分流动参数随时间的变化而改变，则称为非定常流动。

人们常用迹线或流线的概念来描述流场：任何一个流体质点在流场中的运动轨迹称为迹线，迹线是某一流体质点在一段时间内所经过的路径，是同一流体质点在不同时刻所在位置的连线；流线是某一瞬时各流体质点的运动方向线，在该曲线上各点的速度矢量相切于这条曲线。在定常流中，流动与时间无关，流线不随时间改变，流体质点沿着流线运动，流线与迹线重合。对于非定常流，迹线与流线是不同的。

下面给出一维定常流的 3 个基本方程：连续（质量）方程、动量方程、能量方程。

(1) 连续（质量）方程。连续方程是把质量守恒定律应用于流体，所得的数学表达式。一维定常流连续方程的微分形式为

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (1-9)$$

连续方程是质量守恒的数学表达式，与流体的性质、是否有黏性作用、是否有其他外力作用、是否有外加热无关。

(2) 动量方程。动量方程是把牛顿第二运动定律应用于运动流体所得到的数学表达式。此定律可表述为：在某一瞬时，体系的动量对时间的变化率等于该瞬时作用在该体系上的全部外力的合力，而且动量的时间变化率的方向与合力的方向相同。

设环境对瞬时占据控制体内的流体的全部作用力为 $\sum \vec{F}$ ，则根据牛顿第二运动定律得到

$$\sum \vec{F} = \dot{m}(\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \quad (1-10)$$

上式就是牛顿第二运动定律适用于控制体时的表达式。它说明在定常流中，作用在控制体上的全部外力的合力 $\sum \vec{F}$ ，应等于控制面 2 流体动量的流出率与控制面 1 流体动量的流入率的差值。当我们需要研究流体在流动过程中的详细变化情况时，就需要知道微分形式的动量方程，即

$$\rho g dz + dp + \rho V dV = 0 \quad (1-11)$$

上式是无黏流体一维定常流动的运动微分方程，它表明沿任一流线，流体质点的压强、密度、速度和位移之间的微分关系。

(3) 能量方程。能量方程是热力学第一定律应用于流动流体，所得到的数学表达式。不可压无黏流体的能量方程表达式为

$$g dz + d\left(\frac{p}{\rho}\right) + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0 \quad (1-12)$$



1.2 流体运动的基本概念

下面简要介绍一下流体运动的几个基本概念, 这些概念都是有关流体运动的最基本的术语, 读者有必要了解一下。

1.2.1 层流流动与紊流流动

当流体在圆管中流动时, 如果管中流体是一层一层流动的, 各层间互不干扰、互不相混, 这样的流动状态称为层流流动。当流速逐渐增大时, 流体质点除了沿管轴向运动, 还有垂直于管轴方向的横向流动, 即层流流动已被打破, 完全处于无规则的乱流状态, 这种流动状态称为紊流或湍流。我们把流动状态发生变化(从层流到紊流)时的流速称为临界速度。

大量实验数据与相似理论证实, 流动状态不仅取决于临界速度, 而是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数来决定的。雷诺数 Re 定义为

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (1-13)$$

式中, d 为管道直径; V 为平均流速; μ 为动力黏性系数。

由层流开始转变到紊流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数, 用 Re'_{cr} 表示; 由紊流转变为层流所对应的雷诺数称为下临界雷诺数, 用 Re_{cr} 表示。通过比较实际流动的雷诺数 Re 与临界雷诺数, 就可确定黏性流体的流动状态。

- (1) 当 $Re < Re_{cr}$ 时, 流动为层流状态。
- (2) 当 $Re > Re'_{cr}$ 时, 流动为紊流状态。
- (3) 当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时, 可能为层流, 也可能为紊流。

在工程应用中, 取 $Re_{cr} = 2000$ 。当 $Re < 2000$ 时, 流动为层流流动; 当 $Re > 2000$ 时, 可认为流动为紊流流动。

实际上, 雷诺数反映了惯性力与黏性力之比; 雷诺数越小, 表明流体黏性力作用较大, 能够削弱引起紊流流动的扰动, 保持层流状态; 雷诺数越大, 表明惯性力对流体的作用更明显, 易使流体质点发生紊流流动。

1.2.2 有旋流动与无旋流动

有旋流动是指流场中的流体微团的旋转角速度不等于零的流动, 无旋流动是指流场中各处的旋度都为零的流动。流体质点的旋度是一个矢量, 用 ω 表示, 其表达式为

$$\omega = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1-14)$$

若 $\omega = 0$, 则称流动为无旋流动, 否则为有旋流动。

流体运动是有旋还是无旋, 取决于流体微团是否有旋转运动, 与流体微团的运动轨迹无关。流体流动中, 如果考虑黏性, 由于存在摩擦力, 这时的流动为有旋流动。如果黏性可以忽略, 而来流本身



Note



又是无旋流，如均匀流，这时的流动为无旋流动。例如，均匀气流流过平板，在紧靠壁面的附面层内，需要考虑黏性影响。因此，附面层内为有旋流动，而附面层外的流动，黏性可以忽略，因此可视为无旋流动。



Note

1.2.3 声速与马赫数

声速是指微弱扰动波在流体介质中的传播速度，它是流体可压缩性的标志，对于确定可压缩流的特性和规律起着重要作用。声速表达式的微分形式为

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-15)$$

当声音在气体中传播时，由于在微弱扰动的传播过程中，气流的压强、密度和温度的变化都是无限小量，若忽略黏性作用，整个过程接近可逆过程，同时该过程进行得很迅速，又接近一个绝热过程，所以微弱扰动的传播可以认为是一个等熵的过程。对于完全气体，声速又可表示为

$$c = \sqrt{kRT} \quad (1-16)$$

式中， k 为比热比； R 为气体常数。

上述公式只能用来计算微弱扰动的传播速度；对于强扰动，如激波、爆炸波等，其传播速度比声速大，并随波的强度增大而加快。

流场中某点处气体流速 V 与声速 c 之比称为该点处气流的马赫数，用 Ma 表示，即

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1-17)$$

马赫数表示气体宏观运动的动能与气体内部分子无规则运动的动能（即内能）之比。当 $Ma \leq 0.3$ 时，密度的变化可以忽略；当 $Ma > 0.3$ 时，就必须考虑气流压缩性的影响。因此，马赫数是研究高速流动的重要参数，是划分高速流动类型的标准。当 $Ma > 1$ 时，为超声速流动；当 $Ma < 1$ 时，为亚声速流动；当 $Ma \approx 1$ 时，为跨声速流动；当 $1 < Ma < 3$ 时，为跨声速流动；当 $Ma > 3$ 时，为超超声速流动。超声速流动与亚声速流动的规律有本质的区别，跨声速流动兼有超声速与亚声速流动的某些特点，是更复杂的流动。

1.2.4 膨胀波与激波

膨胀波与激波是超声速气流特有的重要现象，超声速气流在加速时产生膨胀波，减速时一般会出现激波。

当超声速气流流经由微小外折角所引起的马赫波时，气流加速，压强和密度下降，这种马赫波就是膨胀波。超声速气流沿外凸壁流动的基本微分方程为

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\theta}{\sqrt{Ma^2 - 1}} \quad (1-18)$$

当超声速气流绕物体流动时，在流场中往往出现强压缩波，即激波。气流经过激波后，压强、温度和密度均突然升高，速度则突然下降。超声速气流被压缩时一般都会产生激波，所以激波是超声速气流中的重要现象之一。按照激波的形状，可将激波分为以下几类。

- (1) 正激波：气流方向与波面垂直。
- (2) 斜激波：气流方向与波面不垂直。例如，当超声速气流流过楔形物体时，在物体前缘往往产生斜激波。
- (3) 曲线激波：波形为曲线形。



设激波前的气流速度、压强、温度、密度和马赫数分别为 v_1 、 p_1 、 T_1 、 ρ_1 、 Ma_1 ，经过激波后突然增加到 v_2 、 p_2 、 T_2 、 ρ_2 、 Ma_2 ，则激波前后气流应满足以下方程。

连续性方程：

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (1-19)$$

动量方程：

$$p_2 - p_1 = \rho_1 v_1^2 - \rho_2 v_2^2 \quad (1-20)$$

能量方程：

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-21)$$

状态方程：

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-22)$$

据此，可得出激波前后参数的关系为

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} Ma_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \quad (1-23)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{k-1}{k+1} + \frac{2}{(k+1)Ma_1^2} \quad (1-24)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} Ma_1^2}{\frac{2}{k-1} + Ma_1^2} \quad (1-25)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{2kMa_1^2 - k + 1}{k + 1} \right) \left(\frac{2 + (k-1)Ma_1^2}{(k+1)Ma_1^2} \right) \quad (1-26)$$

$$\frac{Ma_2^2}{Ma_1^2} = \frac{Ma_1^{-2} + \frac{k-1}{2}}{kMa_1^2 - \frac{k-1}{2}} \quad (1-27)$$



Note

1.3 附面层理论

附面层是流体力学中经常涉及的一个概念，下面进行简要介绍。

1.3.1 附面层概念及附面层厚度

当黏性较小的流体绕物体流动时，黏性的影响仅限于贴近物面的薄层中。在薄层之外，黏性的影响可以忽略。普朗特把物面上受到黏性影响的这一薄层称为附面层（或边界层）。他在大雷诺数下，附面层非常薄的前提下，对黏性流体运动方程做了简化，得到了被人们称为普朗特方程的附面层微分方程。

附面层厚度 δ 的定义：如果以 V_0 表示外部无黏流速度，则通常把各个截面上速度达到 $V_x = 0.99V_0$ 或 $V_x = 0.995V_0$ 值的所有点的连线定义为附面层外边界，而将从外边界到物面的垂直距离定义为附面层厚度。



Note

1.3.2 附面层微分方程

根据附面层概念对黏性流动的基本方程的每一项进行数量级的估计, 忽略数量级较小的量, 这样在保证一定精度的情况下, 使方程得到简化, 得出适用于附面层的基本方程。

1. 层流附面层方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} &= 0 \\ V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (1-28)$$

上面是平壁面二维附面层方程, 适用于平板及楔形物体。式(1-28)求解的边界条件如下。

- (1) 在物面上 $y=0$ 处, 满足无滑移条件, $V_x=0, V_y=0$ 。
- (2) 在附面层外边界 $y=\delta$ 处, $V_x=V_0(x)$ 。 $V_0(x)$ 是附面层外部边界上无黏流的速度, 它由无黏流场在求解中获得, 在计算附面层流动时, 为已知的参数。

2. 紊流附面层方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} &= 0 \\ \bar{V}_x \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + \bar{V}_y \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dPe}{dx} + \nu \frac{\partial^2 \bar{V}_x}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{V'_x V'_y}) \end{aligned} \quad (1-29)$$

对于附面层方程, 在 Re 数很高时, 才有足够的精度, 在 Re 数不比 1 大许多的情况下, 附面层方程是不适用的。

1.4 流体运动及换热的多维方程组

本节将给出求解流体运动与换热的多维方程组。

1.4.1 物质导数

把流场中的物理量看作空间和时间的函数

$$T = T(x, y, z, t), \quad p = p(x, y, z, t), \quad v = v(x, y, z, t)。$$

研究各物理量对时间的变化率, 例如速度分量 u 对时间的变化率, 则有

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1-30)$$

上式中的 u 、 v 、 w 分别为速度沿 x 、 y 、 z 3 个方向的速度矢量。

将上式中的 u 用 N 替换, 代表任意物理量, 得到任意物理量 N 对时间 t 的变化率, 则有

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} + w \frac{\partial N}{\partial z} \quad (1-31)$$



这就是任意物理量 N 的物质导数，也称为质点倒数。

1.4.2 不同形式的 N-S 方程

下面给出不同形式的 N-S 方程。

由流体的黏性本构方程得到直角坐标系下的 N-S (Navier-Stokes) 方程为

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right] \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right] \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right]\end{aligned}\quad (1-32)$$

如果忽略黏性的变化，认为黏性系数为常数，则式 (1-32) 可简化为矢量形式的 N-S 方程：

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho F - \nabla p + \mu \nabla^2 v + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot v) \quad (1-33)$$

对于不可压流， $\nabla \cdot v = 0$ ，则由式 (1-33) 得，不可压流常黏性系数的 N-S 方程：

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho F - \nabla p + \mu \nabla^2 v \quad (1-34)$$

在处理实际问题时，为提高边界附近数值计算的精度，使用贴体的任意曲线坐标系对方程进行求解。根据直角坐标系中建立的流体力学诸方程，可利用雅可比 (Jacobian) 理论导出任意曲线坐标系下的流体力学诸方程。忽略质量力后，在直角坐标系中流体力学诸方程的统一形式可写为

$$\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} + K \quad (1-35)$$

式中， F 、 G 、 H 为力学体系； R 、 S 、 T 为黏性项； K 为压力项。各项的表达式为

$$\begin{aligned}F &= \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho uw \end{bmatrix} & G &= \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ \rho vw \end{bmatrix} & H &= \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 \end{bmatrix} \\ R &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} & S &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} & T &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \end{bmatrix} & K &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial x} \\ -\frac{\partial p}{\partial y} \\ -\frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

利用守恒方程坐标不变性方程式，将式 (1-35) 变换为 (ξ, η, ζ) 坐标系下相应的 N-S 方程组：

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{H}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \hat{R}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{S}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{T}}{\partial \zeta} + K \quad (1-36)$$

式中



Note



Note

$$\hat{F} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U U \\ \rho U V \\ \rho U W \end{bmatrix} \quad \hat{G} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho U V \\ \rho V V \\ \rho V W \end{bmatrix} \quad \hat{H} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho U W \\ \rho V W \\ \rho W W \end{bmatrix}$$

$$\hat{R} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_x \tau_x^\xi + \xi_y \tau_y^\xi + \xi_z \tau_z^\xi \\ \eta_x \tau_x^\xi + \eta_y \tau_y^\xi + \eta_z \tau_z^\xi \\ \zeta_x \tau_x^\xi + \zeta_y \tau_y^\xi + \zeta_z \tau_z^\xi \end{bmatrix} \quad \hat{S} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_x \tau_x^\eta + \xi_y \tau_y^\eta + \xi_z \tau_z^\eta \\ \eta_x \tau_x^\eta + \eta_y \tau_y^\eta + \eta_z \tau_z^\eta \\ \zeta_x \tau_x^\eta + \zeta_y \tau_y^\eta + \zeta_z \tau_z^\eta \end{bmatrix}$$

$$\hat{T} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_x \tau_x^\zeta + \xi_y \tau_y^\zeta + \xi_z \tau_z^\zeta \\ \eta_x \tau_x^\zeta + \eta_y \tau_y^\zeta + \eta_z \tau_z^\zeta \\ \zeta_x \tau_x^\zeta + \zeta_y \tau_y^\zeta + \zeta_z \tau_z^\zeta \end{bmatrix} \quad \hat{K} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \rho G_{\xi\xi} - g^{\xi\xi} p_\xi - g^{\xi\eta} p_\eta - g^{\xi\zeta} p_\zeta \\ \rho G_{\eta\eta} - g^{\eta\xi} p_\xi - g^{\eta\eta} p_\eta - g^{\eta\zeta} p_\zeta \\ \rho G_{\zeta\zeta} - g^{\zeta\xi} p_\xi - g^{\zeta\eta} p_\eta - g^{\zeta\zeta} p_\zeta \end{bmatrix}$$

其中, J 为雅可比行列式, 其表达式为

$$J = \frac{\partial(\xi, \eta, \zeta)}{\partial(x, y, z)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{vmatrix}^{-1}$$

可压方程中, 密度是参变量而不是常数, 方程组中增添一个能量方程。略去质量力、化学反应和辐射效应, 在直角坐标系中的雷诺平均 N-S 方程组为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial G_v}{\partial z} \quad (1-37)$$

式中

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho e + p)v \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e + p)w \end{bmatrix}$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \tau_{xz}w - q_x \end{bmatrix} \quad E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \tau_{yz}w - q_y \end{bmatrix} \quad G_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{zx}u + \tau_{zy}v + \tau_{zz}w - q_z \end{bmatrix}$$

其中

$$e = \frac{1}{\gamma - 1} p + \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2 + w^2)$$



$$\begin{aligned}
 q_x &= -\left(1 + \frac{\mu_T}{\mu} \frac{Pr}{Pr_t}\right) k \frac{\partial T}{\partial x}, \\
 q_y &= -\left(1 + \frac{\mu_T}{\mu} \frac{Pr}{Pr_t}\right) k \frac{\partial T}{\partial y}, \\
 q_z &= -\left(1 + \frac{\mu_T}{\mu} \frac{Pr}{Pr_t}\right) k \frac{\partial T}{\partial z}, \\
 \frac{\mu}{\mu_0} &= \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T_0 + T_s}{T + T_s}\right), \\
 k &= C_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_t}\right)
 \end{aligned}$$

在以上各式中, Pr (Prandtl) 为普朗特数, 可取 0.72; Pr_t 为湍流普朗特数, 取 0.9; μ 为分子黏性系数, 由萨瑟兰势 (Sutherland) 公式确定; μ_T 为湍流黏性系数; k 为导热系数。

1.4.3 能量方程与导热方程

描述固体内部温度分布的控制方程为导热方程, 直角坐标系下三维非稳态导热微分方程的一般形式为

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \Phi \quad (1-38)$$

式中, t 、 ρ 、 c 、 Φ 及 τ 分别为微元体的温度, 密度, 比热容, 单位时间、单位体积的内热源生成热及时间, λ 为导热系数。如果将导热系数看作常数, 在无内热源且稳态的情况下, 上式可简化为拉普拉斯 (Laplace) 方程

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1-39)$$

用来求解对流换热的能量方程为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1-40)$$

式中, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$, 称为热扩散率。 u 、 v 、 w 为流体速度的分量, 对于固体介质, 则 $u = v = w = 0$, 这时能量方程 (1-40) 即为求解固体内部温度场的导热方程。

1.5 湍流模型

目前, 处理湍流数值计算问题有 3 种方法: 直接数值模拟 (DNS) 方法、大涡模拟 (LES) 方法和雷诺平均 N-S 方程 (RANS) 方法。其中, RANS 方法能够应用于工程计算。雷诺平均 N-S 方程方法首先将满足动力学方程的湍流瞬时运动分解为平均运动和脉动运动两部分, 然后把脉动运动部分对平均运动的贡献通过雷诺应力项来模化, 通过湍流模式来封闭雷诺平均 N-S 方程使之可以求解。根据对模式处理的出发点不同, 可将湍流模式理论分为两大类: 一类为雷诺应力模式, 另一类为涡黏性封闭模式。



Note

在工程湍流问题中得到广泛应用的是涡黏性模式。这是由布西内斯克 (Boussinesq) 仿照分子黏性的思路提出的, 即假设雷诺应力为

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left(U_{i,j} + U_{j,i} + \frac{2}{3} U_{k,k} \delta_{ij} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (1-41)$$

式中, $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$ 是湍动能; ν_t 为涡黏性系数。这便是最早提出的基准涡黏性模式, 即假设雷诺应力与平均速度应变率呈线性关系, 当平均速度应变率确定后, 6 个雷诺应力只需要通过确定一个涡黏性系数 ν_t 就可以完全确定, 且涡黏性系数各向同性, 可以通过附加的湍流量来模化, 比如湍动能 k 、耗散率 ε , 比耗散率 ω 以及其他湍流量 $\tau = k / \varepsilon$ 、 $l = k^{3/2} / \varepsilon$ 、 $q = \sqrt{k}$ 。根据引入湍流量的不同, 可以得到不同的涡黏性模式, 如 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模式等。对应不同模式, 涡黏性系数可表示为

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (k-\varepsilon \text{ 模式}), \quad \nu_t = C_\mu \frac{k}{\omega} \quad (k-\omega \text{ 模式})$$

为了使控制方程封闭, 引入多少个附加的湍流量, 同时, 求解多少个附加的微分方程。根据要求的附加微分方程的数目, 一般可将涡黏性模式分为 3 类: 零方程和半方程模式、一方程模式、两方程模式。

所有一方程和两方程的湍流模式都可写为如下的一般形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(X) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(X) = S_p + S_D + D \quad (1-42)$$

式中, S_p 是产生源项; S_D 是破坏源项; D 表示扩散项, 其形式为 $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\right) \frac{\partial X}{\partial x_j} \right]$ 。

1. SST $k-\omega$ 双方程模型

该模型在近壁处采用 Wilcox $k-\omega$ 模型, 在边界层边缘和自由剪切层采用 $k-\varepsilon$ 模型 ($k-\omega$ 形式), 其间通过一个混合函数来过渡。 $k-\omega$ 湍流模型主要求解湍动能 k 及其比耗散率 ω 的对流输运方程, 对于 SST $k-\omega$ 双方程模型, 其湍动能输运方程为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} S_{ij} - \beta^* \rho \omega k \quad (1-43)$$

湍流比耗散率方程为

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k \partial \omega}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1-44)$$

上两式中, 雷诺应力的涡黏性模型为

$$\tau_{ij} = 2\mu_t (S_{ij} - S_{m,m} \delta_{ij} / 3) - 2\rho k \delta_{ij} / 3 \quad (1-45)$$

$\mu_t = \rho k / \omega$ 为涡黏性, S_{ij} 为平均速度应变率张量, δ_{ij} 为克罗内克算子。 P_ω 为生成项:

$$P_\omega = 2\gamma \rho (S_{ij} - \omega S_{m,m} \delta_{ij} / 3) S_{ij} \quad (1-46)$$

F_1 、 β 、 γ 、 σ_k 、 σ_ω 均为模型参数, β^* 为模型常数, 取 0.09。

2. RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型是从暂态 N-S 方程中得出的, 其中 k 方程和 ε 方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1-47)$$



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (1-48)$$

与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型考虑了湍流漩涡的影响, 并为湍流 Prandtl 数提供了一个解析公式, 因而, RNG 模型相比于标准 $k-\varepsilon$ 模型对瞬变流和流线弯曲的影响能做出更好的反应。



Note

3. SA 湍流模型

用 SA 模型求解一个有关涡黏性的变量 $\hat{\nu}$ 的方程表达式为

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho \hat{\nu} f_{v_1}, \\ f_{v_1} &= \frac{x^3}{x^3 + C_{v_1}^3}, \\ x &\equiv \frac{\hat{\nu}}{\nu} \end{aligned}$$

SA 模型方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} &= C_{b_1} (1 - f_{t_2}) \Omega \hat{\nu} + \\ &\frac{M_\infty}{Re} \left\{ C_{b_1} \left[(1 - f_{t_2}) f_{v_2} + f_{t_2} \right] \frac{1}{k^2} - C_{w_1} f_w \right\} \left(\frac{\hat{\nu}}{d} \right)^2 - \\ &\frac{M_\infty}{Re} \frac{C_{b_2}}{\sigma} \hat{\nu} \frac{\partial^2 \hat{\nu}}{\partial x_j^2} + \frac{M_\infty}{Re} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[\nu + (1 + C_{b_2}) \hat{\nu} \right] \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \quad (1-49)$$

式中, d 为到物面的最近距离。

$$\begin{aligned} f_{t_2} &= C_{t_3} \exp(-C_{t_4} x^2), \\ f_w &= g \left(\frac{1 + C_{w_3}^6}{g^6 + C_{w_3}^6} \right)^{\frac{1}{6}} = \left(\frac{g^{-6} + C_{w_3}^{-6}}{1 + C_{w_3}^{-6}} \right)^{-\frac{1}{6}} \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} g &= r + C_{w_2} (r^6 - r), \\ r &= \frac{\hat{\nu}}{\hat{S} \left(\frac{Re}{M_\infty} \right) k^2 d^2}, \\ S &= \Omega + \frac{\hat{\nu} f_{v_2}}{\left(\frac{Re}{M_\infty} \right) k^2 d^2}, \\ f_{v_2} &= 1 - \frac{x}{1 + x f_{v_1}} \end{aligned}$$

其中的各个常数分别为

$$\begin{aligned} C_{b_1} &= 0.1355, & \sigma &= \frac{2}{3}, & C_{b_2} &= 0.622, & k &= 0.41 \\ C_{w_3} &= 2.0, & C_{v_1} &= 7.1, & C_{t_3} &= 1.2, & C_{t_4} &= 0.5 \\ C_{w_2} &= 0.3, & C_{w_1} &= \frac{C_{b_1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b_2})}{\sigma} \end{aligned}$$



Note

如果用湍流模型的一般形式即式 (1-42) 表示, 令 $X = \hat{v}$, 则

$$S_p = C_{b_1} (1 - f_{t_2}) \Omega \hat{v},$$

$$S_D = \frac{M_\infty}{\text{Re}} \left\{ C_{b_1} \left[(1 - f_{t_2}) f_{v_2} + f_{t_2} \right] \frac{1}{k^2} - C_{w_1} f_w \right\} \left(\frac{\hat{v}}{d} \right)^2,$$

$$D = -\frac{M_\infty}{\text{Re}} \frac{C_{b_2}}{\sigma} \hat{v} \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial x_j^2} + \frac{M_\infty}{\text{Re}} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[\nu + (1 + C_{b_2}) \hat{v} \right] \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right\}$$

$k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型和 SA 模型都有各自的性能特点: SA 模型对附着边界层的模拟效果同零方程模型相似, 除射流外, SA 对自由剪切湍流的计算精度更高; $k-\varepsilon$ 模型是应用最广泛的湍流模型; $k-\omega$ 模型对自由剪切湍流、附着边界层湍流和适度分离湍流都有较高的计算精度。

1.6 计算网格与边界条件

下面简要介绍一下计算网格和边界条件, 它们是流场分析要涉及的一些基本概念。

1.6.1 计算网格

计算网格的合理设计和高质量的生成是 CFD 的前提条件。计算网格按网格点之间的邻近关系可分为结构网格、非结构网格和混合格网。结构网格的网格点之间的邻近关系是有序而规则的, 除边界点外, 内部网格点都有相同的邻近网格数, 其单元是二维的四边形和三维的六面体。非结构网格点之间的邻接是无序的、不规则的, 每个网格点可以有不同的邻接网格数, 单元有二维的三角形、四边形, 三维的四面体、六面体、三棱柱体和金字塔等多种形状。混合格网是对结构网格与非结构网格的混合。结构网格可以方便索引, 可以减少相应的存储开销, 而且由于网格的贴体性, 流场的计算精度可以大大提高。非结构网格能够方便地生成复杂外形的网格, 能够通过流场中的大梯度区域自适应来提高对间断 (如激波) 的分辨率, 并且使基于非结构网格的网格分区以及并行计算比结构网格更加直接。但是在同等网格数量的情况下, 非结构网格比结构网格所需的内存更大、计算周期更长, 而且同样的区域可能需要更多的网格数。此外, 在采用完全非结构网格时, 因为网格分布各向同性, 会降低计算结果的精度, 同时对黏流计算而言, 还会导致边界层附近的流动分辨率不高。

1.6.2 边界条件

1. 入口边界条件

(1) 压力入口: 在计算喷管热燃气流场时, 可以给出压力入口条件, 其中需要输入的主要参数有总压、静压、总温等。

(2) 质量入口: 在模拟冷却通道内的流动时, 通常在冷却剂流量已知的情况下, 可以给出质量流量入口条件。由于入口边界上的质量流量给定, 入口压力在计算的收敛过程中是变化的。如果将冷却剂在冷却通道内的流动看作不可压或弱可压, 则可用速度入口代替质量流量入口。

2. 出口边界条件

(1) 压力出口: 在燃气流场和冷却通道的计算中, 都可使用出口压力边界条件。该条件需给定



出口边界上的静压强，如果当地速度超过音速，则需要根据来流外推出口边界条件。

(2) 无穷远压力边界：在计算某些外流场时，可给出无穷远压力边界条件，该边界条件适用于理想气体定律计算密度的问题。在边界上需要给出静压、温度和马赫数。

3. 对称边界条件

对具有一定几何特征的物理模型，可取其部分进行计算。例如，轴对称喷管可取半根冷却通道进行计算，截取后的对称平面需给出对称边界条件。



Note

第 2 章

流体流动分析软件概述

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是从 20 世纪 60 年代起伴随计算机技术迅速崛起的一门新型独立学科。它是在流体动力学以及数值计算方法的基础上建立的, 以研究物理问题, 通过计算机数值计算和图像显示方法, 在时间和空间上定量地描述流场数值解。

本章将简要介绍 CFD 软件以及 Fluent 软件的相关基础知识, 帮助读者初步认识 Fluent 软件。



2.1 CFD 软件简介

经过发展, CFD 通用性软件陆续出现, 成为解决各种流体流动与传热问题的强有力的工具, 并作为一种商品化软件被工业界广泛接受。随着其性能日趋完善以及应用范围的不断扩大, 如今 CFD 技术早已超越了传统的流体机械与流体工程等应用范畴, 成功应用于航空、航运、海洋、环境、水利、食品、化工、核能、冶金、建筑等各种科学技术领域。

CFD 通用软件的出现与商业化, 对 CFD 技术在工程应用中的推广起了巨大的促进作用。但由于 CFD 依赖于系统的流体动力学知识和较深的数理基础, 这些理论背景与流体力学问题的复杂多变阻碍了它向工业界的推广。如何将 CFD 研究成果与实际应用相结合成为难题。在此情况下, 通用软件包应运而生。英国 CHAM (Concentration Heat and Momentum Limited) 公司的 Spalding 与 Patankar 在 20 世纪 70 年代提出了 SIMPLE 算法(半隐式压力校正解法), 在 80 年代初以该方法为基础推出了计算流体力学与传热学的商业化软件 PHOENICS 的早期版本。在其版本不断更新的同时, 新的通用软件, 如 Fluent、STAR-CD 与 CFX 等也相继问世。这些软件十分重视商业化的要求, 致力于工程实际应用, 并在前、后处理人机对话等方面成绩卓越, 从而被工业界所认识和接受。进入 90 年代, 更多的商业化 CFD 应用软件如雨后春笋般出现, 涉及范围越来越广。CFD 通用软件以其模拟复杂流动现象的强大功能、人机对话式的界面操作以及直观清晰的流场显示引起了人们的广泛关注。

2.1.1 CFD 软件结构

CFD 通用软件的数学模型的组成都是以纳维-斯托克斯方程组与各种湍流模型为主体, 再加上多相流模型、燃烧与化学反应流模型、自由面流模型以及非牛顿流体模型等。大多数附加模型是在主体方程组上补充一些附加源项、附加输运方程与关系式。随着应用范围的不断扩大和新方法的出现, 新的模型也在增加离散方法, 采用有限体积法(FVM)或有限元法(FEM)。由于有限体积法继承了有限差分法的丰富格式, 具有良好的守恒性, 能像有限元素法那样采用各种形状的网络以适应复杂的边界几何形状, 且比有限元素法简便得多, 因此现在大多数 CFD 软件都采用有限体积法。

CFD 通用软件应能适应从低速到高超声速。然而跨、超声速流动计算涉及激波的精确捕获, 对离散格式精度要求甚高, 难度较大。由于跨、超声速流动主要存在于各种飞行器、高速旋转叶轮机械以及高速喷管、阀门等, 在其他工程应用中很少出现, 所以有些主要面向低速流动的 CFD 通用软件在高速流动方面功能比较弱。

CFD 软件的流动显示模块都具有三维显示功能, 可以展现各种流动特性, 有的还能以动画功能演示非定常过程。

为方便用户使用 CFD 软件处理不同类型的工程问题, 一般的 CFD 商用软件往往将复杂的 CFD 过程集成, 通过一定的接口, 让用户快速地输入问题的有关参数。所有的商用 CFD 软件均包括 3 个基本环节: 前处理、求解和后处理。与之对应的程序模块常简称前处理器、求解器、后处理器。下面简要介绍这 3 个程序模块。

1. 前处理器

前处理器(preprocessor)用于完成前处理工作。前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据, 该过程一般是借助与求解器相对应的对话框等图形界面来完成的。在前处理阶段需要用户进行以下工作。



Note

- 定义所求问题的几何计算域。
- 将计算域划分成多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格。
- 对所研究的物理和化学现象进行抽象，选择相应的控制方程。
- 定义流体的属性参数。
- 为计算域边界处的单元指定边界条件。
- 对于瞬态问题，指定初始条件。

流动问题的解是在单元内部的节点上定义的，解的精度由网格中单元的数量所决定。一般来讲，单元越多、尺寸越小，所得到解的精度越高，但所需要的计算机内存资源及 CPU 时间也相应增加。为了提高计算精度，在物理量梯度较大的区域，以及我们感兴趣的区域，往往要加密计算网格。在前处理阶段生成计算网格时，关键是要把握好计算精度与计算成本之间的平衡。

目前，在使用商用 CFD 软件进行 CFD 计算时，有 50% 以上的时间花在几何区域的定义及计算网格的生成上。我们可以使用 CFD 软件自身的前处理器来生成几何模型，也可以借用其他商用 CFD 或 CAD/CAE 软件，如 Patran、Ansys、I-DEAS、Pro/Engineer 协助提供的几何模型。此外，指定流体参数的任务也是在前处理阶段进行的。

2. 求解器

求解器 (solver) 的核心是数值求解方案。常用的数值求解方案包括有限差分、有限元、谱元法和有限体积法等。总体上讲，这些方法的求解过程大致相同，包括以下步骤。

- 借助简单函数来近似待求的流动变量。
- 将该近似关系代入连续型的控制方程，形成离散方程组。
- 求解代数方程组。

各种数值求解方案的主要差别在于流动变量被近似的方式及相应的离散化过程。

3. 后处理器

后处理的目的是有效地观察和分析流动计算结果。随着计算机图形功能的提高，目前的 CFD 软件均配备了后处理器 (postprocessor)，提供了如下较为完善的后处理功能。

- 计算域的几何模型及网格显示。
- 矢量图 (如速度矢量线)。
- 等值线图。
- 填充型的等值线图 (云图)。
- XY 散点图。
- 粒子轨迹图。
- 图像处理功能 (平移、缩放、旋转等)。

借助后处理功能，还可以动态模拟流动效果，直观地了解 CFD 的计算结果。

2.1.2 CFD 基本模型

流体流动所遵循的物理定律，是建立流体运动基本方程组的依据。这些定律主要包括质量守恒、动量守恒、动量矩守恒、能量守恒、热力学第二定律，以及状态方程、本构方程。在实际计算时，还要考虑不同的流态，如层流与湍流。湍流模型是 CFD 软件的主要组成部分之一。通用 CFD 软件都配有各种层次的湍流模型，通常可分为 3 类：第一类是湍流输运系数模型，即将速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流黏性系数的乘积，用笛卡儿张量表示为



$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2-1)$$

模型的任务就是给出计算湍流黏性系数 μ_t 的方法。根据建立模型所需要的微分方程的数目，可以分为零方程模型（代数方程模型）、单方程模型和双方程模型。

第二类是抛弃了湍流输运系数的概念，直接建立湍流应力和其他二阶关联量的输运方程。

第三类是大涡模拟。前两类是以湍流的统计结构为基础，对所有涡旋进行统计平均。大涡模拟把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解三维经过修正的 Navier-Stokes 方程（简称 N-S 方程），得到大涡旋的运动特性，而对小涡旋运动还是采用上述模型。

1. 系统与控制体

在流体力学中，系统是指某一确定流体质点集合的总体。系统以外的环境称为外界。分隔系统与外界的界面，称为系统的边界。系统通常是研究的对象，外界则用来区别系统。系统将随系统内质点一起运动，系统内的质点始终包含在系统内，系统边界的形状和所围空间的大小可随运动而变化。系统与外界无质量交换，但可以有力的相互作用及能量（热和功）的交换。

控制体是指在流体所在的空间中，以假想或真实流体边界包围固定不动、形状任意的空间体积。包围这个空间体积的界面，称为控制面。控制体的形状与大小不变，并相对于某坐标系固定不动。控制体内的流体质点组成并非不变。控制体既可以通过控制面与外界进行质量和能量交换，也可以与控制体外的环境进行力的相互作用。

2. 质量守恒方程（连续性方程）

在流场中，流体通过控制面 A_1 流入控制体，同时也会通过另一部分控制面 A_2 流出控制体，在这期间控制体内部的流体质量也会发生变化。按照质量守恒定律，流入的质量与流出的质量之差，应该等于控制体内部流体质量的增量，由此可导出流体流动连续性方程的积分形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \iint_A \rho v \cdot n dA = 0 \quad (2-2)$$

式中， V 表示控制体； A 表示控制面。等式左边第一项表示控制体 V 内部质量的增量；第二项表示通过控制表面流入控制体的净通量。

根据数学中的奥-高公式，在直角坐标系下可将其化为微分形式，即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-3)$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-4)$$

对于圆柱坐标系，其形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_\theta)}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2-5)$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2-6)$$

3. 动量守恒方程（运动方程）

动量守恒是流体运动时应遵循的另一个普遍定律，即在一给定的流体系统中，其动量的时间变化



Note



率等于作用在其上的外力总和，其数学表达式即为动量守恒方程（运动方程或 N-S 方程），其微分形式为

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = \rho F_{bx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} = \rho F_{by} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{dw}{dt} = \rho F_{bz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (2-7)$$

式中， F_{bx} 、 F_{by} 、 F_{bz} 分别是单位质量流体上的质量力在 3 个方向上的分量； p_{yx} 是流体内应力张量的分量。

动量守恒方程在实际应用中许多表达形式，其中比较常见的有如下几种。

(1) 可压缩黏性流体的动量守恒方程。

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = \rho f_x + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\ \rho \frac{dv}{dt} = \rho f_y + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ \rho \frac{dw}{dt} = \rho f_z + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \quad (2-8)$$

(2) 常黏性流体的动量守恒方程。

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad}p + \frac{\mu}{3} \text{grad}(\text{div}v) + \mu \nabla^2 v \quad (2-9)$$

(3) 常密度常黏性流体的动量守恒方程。

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad}p + \mu \nabla^2 v \quad (2-10)$$

(4) 无黏性流体的动量守恒方程（欧拉方程）。

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad}p \quad (2-11)$$

(5) 静力学方程。

$$\rho F = \text{grad}p \quad (2-12)$$

(6) 相对运动方程。

在非惯性参考系中的相对运动方程是研究像大气、海洋及旋转系统中的流体运动所必须考虑的。由理论力学得知，绝对速度 v_a 为相对速度 v_r 及牵连速度 v_c 之和，即 $v_a = v_r + v_c$ 。其中， $v_c = v_0 + \Omega \times r$ ， v_0 为运动系中的平动速度， Ω 是其转动角速度， r 为质点矢径。





而绝对加速度 a_a 等于相对加速度 a_r 、牵连加速度 a_c 及科氏加速度 a_c 之和, 即

$$a_a = a_r + a_c + a_c \quad (2-13)$$

其中, $a_c = \frac{dv_0}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} \times r + \Omega \times (\Omega \times r)$, $a_c = 2\Omega \times v_r$ 。

将绝对加速度代入运动方程, 即得到流体的相对运动方程

$$\rho \frac{dv_r}{dt} = \rho F_b + \text{div}P - a_c - 2\Omega v_r \quad (2-14)$$

4. 能量守恒方程

将热力学第一定律应用于流体运动, 把式 (2-14) 中的各项用有关的流体物理量表示, 即能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_j J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h \quad (2-15)$$

式中, $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$; k_{eff} 是有效热传导系数, $k_{\text{eff}} = k + k_t$, 其中, k_t 是湍流热传导系数, 根据所使用的湍流模型来定义; J_j 是组分 j 的扩散流量; S_h 包括化学反应热以及其他用户定义的体积热源项; 方程右边的前 3 项分别描述了热传导、组分扩散和黏性耗散带来的能量输运。

在实际计算时, 还要考虑不同的流态, 如层流与湍流。在下面的章节中将会详细介绍湍流模型。

2.1.3 常用的 CFD 商用软件

自 1981 年以来, 出现了一系列的 CFD 通用软件, 如 PHOENICS、Fluent、Star-CD、CFX-TASCflow 与 NUMECA 等。PHOENICS 软件是最早推出的 CFD 通用软件, Fluent、Star-CD 与 CFX-TASCflow 是目前国际市场上的主流软件, 而 NUMECA 则使 CFD 通用软件的普及更上一层楼。这些软件通常具有如下显著特点。

- ☑ 应用范围广, 适用性强, 几乎可以处理工程界各种复杂的问题。
- ☑ 前后处理系统以及与其他 CAD、CFD 软件的接口能力比较简单易用, 便于用户快速完成造型、网格划分等工作。同时, 用户还可以根据个人需要扩展自己的开发模块。
- ☑ 具有较完善的容错机制和操作界面, 稳定性较高。
- ☑ 可在多种计算机操作系统以及并行环境下运行。

1. PHOENICS 软件

PHOENICS (parabolic hyperbolic or elliptic numerical integration code series) 软件是世界上第一套计算流体动力学与传热学的商用软件。由 CFD 著名学者 D.B.Spalding 和 S.V.Patankar 等提出, 以低速热流输运现象为主要模拟对象, 目前主要由 CHAM 公司开发。除 CFD 软件的基本特征外, PHOENICS 软件还具有自己独特的特征。

- ☑ 开放性。这个软件附带了从简到繁的大量算例, 一般的工程应用问题几乎都可以从中找到相近的范例, 再做一些修改就可以计算用户的课题, 所以能给用户带来极大方便。
- ☑ 多种模型选择。PHOENICS 包含的湍流模型、多相流模型、燃烧与化学反应模型等, 非常丰富, 如将湍流与层流成分假设为两种流体的双流体湍流模型 MFM、专为组件杂阵的狭小空间 (如计算机箱体) 内的流动和传热计算而设计的代数湍流模型 LEVEL 等。
- ☑ 多种模块选择。PHOENICS 提供了多种专用模块, 用于特定领域的分析计算。如暖通空调计算模块 FLAIR 被广泛应用在小区规划、设计以及高大空间建筑的设计模拟; 英国集成环境



Note



Note

公司 (IES) 的虚拟环境软件, 用它以模拟局部空间的热流现象。

- ☑ 双重算法选择。可采用欧拉算法和基于粒子运动轨迹的拉格朗日算法。
- ☑ 直角形网格 (笛卡儿网格)。PHOENICS 提供了网格局部加密功能与网格被边界切割的补偿功能。
- ☑ 优良性价比。软件的价格比其他 CFD 通用软件低, 其高性价比使之成为国内用户使用最多的软件。

2. CFX 软件

CFX 是全球第一个通过 ISO 9001 质量认证的大型商业 CFD 软件, 由英国 AEA Technology 公司开发, 2003 年被 Ansys 公司收购。目前, 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, 为使用 CFX 软件的全球用户解决了大量的实际问题。

诞生在工业应用背景中的 CFX 一直将精确的计算结果、丰富的物理模型、强大的用户扩展性作为其发展的基本要求, 并以其在这些方面的卓越成就, 引领 CFD 技术不断发展。CFX 与其他 CFD 软件的不同之处如下。

- ☑ 除使用有限体积法外, CFD 还采用基于有限元的有限体积法。
- ☑ 可以直接访问各种 CAD 软件, 如 CADD5、CATIA、Euclid3、Pro/Engineer 和 Unigraphics, 并从任一 CAD 系统 (如 MSC/Patran 和 I-DEAS) 以 IGES 格式直接读入 CAD 图形。
- ☑ 采用 ICEM CFD 前处理模块, 在生成网格时, 可实现边界层网格自动加密、流场变化剧烈区域网格局部加密、分离流模拟等。
- ☑ 可计算的问题包括大批复杂现象的实用模型, 并在其湍流模型中纳入了 $k-\varepsilon$ 模型、低 Reynolds 数 $k-\varepsilon$ 模型、代数 Reynolds 应力模型、大涡模型等多种模型。

3. Star-CD 软件

Star-CD 最初是由流体力学鼻祖英国帝国理工学院计算流体力学领域的专家、教授开发的, 他们根据传统传热基础理论, 合作开发了基于有限体积算法的非结构化网格计算程序。在完全不连续网格、滑移网格和网格修复等关键技术, Star-CD 又经过来自全球 10 多个国家、超过 200 名知名学者的不断补充与完善, 成为同类软件中网格适应性、计算稳定性和收敛性最好的。最新湍流模型的推出使其在计算的稳定性、收敛性和结果的可靠性等方面得到了显著提高。其基本特征如下。

- ☑ 前处理器 Prostar 有较强的 CAD 建模功能, 与当前流行的 CAD/CAE 软件有良好的接口, 可有效地进行数据转换。
- ☑ 具有多种网格划分技术 (如 Extrusion、Multi-block、Data import 等) 和网格局部加密技术, 能够很好地适应复杂计算区域, 处理滑移网格的问题。
- ☑ 多种高级湍流模型, 具有低阶和高阶的差分格式。
- ☑ 其后处理器具有动态和静态显示计算结果的功能。能用速度矢量图来显示流动特性, 用等值线图或颜色来表示各个物理量的计算结果。

4. FIDAP 软件

FIDAP 是由英国 Fluid Dynamics International (FDI) 公司开发的计算流体力学与数值传热学的软件。它是一种基于有限元方法和完全非结构化网格的通用 CFD 软件, 可解决从不压缩到可压缩范围内的复杂流动问题。FIDAP 具有强大的流固耦合功能, 可以分析由流动引起的结构响应问题, 还适合模拟动边界、自由表面、相变、电磁效应等复杂流动问题。FIDAP 的典型应用领域包括汽车、化工、玻璃应用、半导体、生物医学、冶金、环境工程、食品等行业。其特点如下。



- ☑ 完全基于有限元方法，不但可以模拟广泛的物理模型，而且对于质量源项、化学反应等其他复杂现象都可以精确模拟。
- ☑ 具有自由表面模型功能，可同时使用变形网格和固定网格，也可以导入 I-DEAS、Patran、Ansys、ICEM CFD 等软件生成的网格模型。
- ☑ 具有流固耦合分析功能，可同时使用固体结构中的变形和应力，从而模拟液汽界面的蒸发与冷凝相变、材料填充、流面晃动等现象。

5. Fluent 软件

本书将着重介绍该软件，详细内容可参考以下章节。



Note

2.2 Fluent 软件介绍

Fluent 是由美国 Fluent 公司于 1983 推出的 CFD 软件，在美国，市场占有率达到 60%，可解算涉及流体、热传递以及化学反应等工程问题。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术，因而 Fluent 能达到最佳的收敛速度和求解精度。灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使 Fluent 在转捩与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用。例如，井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等。

在工程应用上，Fluent 主要可以用在以下几个方面。

- ☑ 过程和过程装备应用。
- ☑ 油/气能量的产生和环境应用。
- ☑ 航天和涡轮机械的应用。
- ☑ 汽车工业的应用。
- ☑ 热交换应用。
- ☑ 电子/HVAC/应用。
- ☑ 材料处理应用。
- ☑ 建筑设计和火灾研究。

简而言之，Fluent 适用于各种复杂外形的可压和不可压流动计算。对于不同的流动领域和模型，Fluent 公司还提供了其他几种解算器，其中包括 NEKTON、FIDAP、POLYFLOW、IcePak 以及 MixSim。

2.2.1 Fluent 的软件结构

Fluent 2022 主要包括前处理器、求解器和后处理器 3 个部分。

1. 前处理器

前处理器主要用来建立要进行流体动力学分析的几何模型并对模型进行网格划分。在 Fluent 软件被整合到 Ansys 软件包之后，可以通过 Ansys 软件包中的 DesignModeler 或 SpaceClaim 软件来建立几何模型，然后通过 Meshing 软件或者 ICEM CFD 软件来进行网格的划分。

2. 求解器

求解器是 Fluent 软件模拟计算的核心程序。在读入划分好网格的模型文件后，剩下的操作就是利用求解器进行计算，包括材料的设定、边界条件的设置、求解的方法和控制在以及网格的优化等。



3. 后处理器

求解完成后,即可进行后处理操作,包括求解过程的查看、云图的生成、动画的模拟等,这些既可以用 Ansys 软件包中的 CFD-Post 进行操作,也可以用 Fluent 自带的后处理器进行操作。

在 Ansys 公司开发出 Workbench 后,所有的 Fluent 软件被集成在 Ansys Workbench 环境下,可以对 Fluent 分析的前处理、求解和后处理的数据进行传递和分享,集设计、网格划分、仿真、求解、优化功能于一体,对各种数据进行项目协同管理。



Note

2.2.2 Fluent 的功能及特点

1. Fluent 软件的基本结构

Fluent 软件设计基于 CFD 计算机软件群的概念,针对每一种流动的物理问题的特点,采用适合于它的数值解法以在计算速度、稳定性和精度等方面达到最优。

Fluent 软件的结构由前处理、求解器及后处理三大模块组成。Fluent 软件中采用 Gambit 作为专用的前处理软件,使网格可以有多种形状。对于二维流动可以生成三角形和矩形网格;对于三维流动可以生成四面体、六面体、三角柱和金字塔等网格;结合具体计算,还可以生成混合网格。其自适应功能,能对网格进行细分或粗化,或生成不连续网格、可变网格和滑动网格。

Fluent 软件采用的二阶上风格式是 Barth T J 与 Jespersen D C 针对非结构网格提出的多维梯度重构法,后来经过进一步的发展,采用最小二乘法估算梯度,能较好地处理畸变网格的计算。Fluent 率先采用非结构网格使其在技术上处于领先。

Fluent 软件的核心部分是 N-S 方程组的求解模块。用压力校正法作为低速不可压流动的计算方法,包括 SIMPLE、SIMPLER、SIMPLEC、PISO 等。采用有限体积法离散方程,其计算精度和稳定性都优于传统编程中使用的有限差分法。离散格式为对流项二阶迎风插值格式——QUICK (quadratic upwind interpolation for convection kinetics scheme) 格式,其数值耗散较低,精度高且构造简单。而对可压缩流动采用耦合法,即连续性方程、动量方程、能量方程联立求解。湍流模型是包括 Fluent 软件在内的 CFD 软件的主要组成部分。

Fluent 软件配有各种层次的湍流模型,包括代数模型、一方程模型、二方程模型、湍应力模型、大涡模拟等。应用最广泛的二方程模型是 $k_2\varepsilon$ 模型,软件中收录有标准 $k_2\varepsilon$ 模型及其几种修正模型。

Fluent 软件的后处理模块具有三维显示功能,可以展现各种流动特性,并能以动画功能演示非定常过程,从而以直观的形式展示模拟效果,便于进一步的分析。该软件的使用步骤如图 2-1 所示。

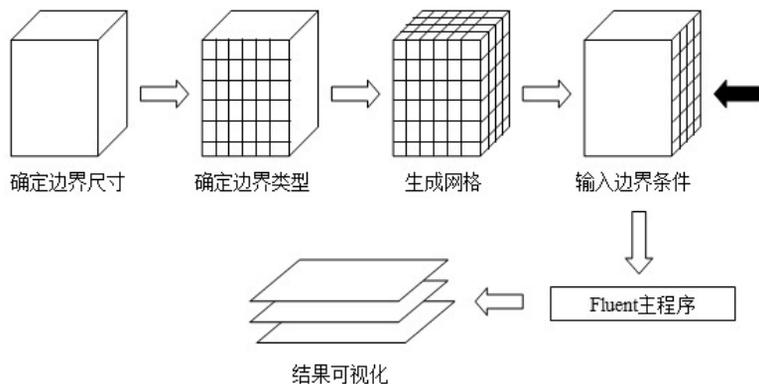


图 2-1 Fluent 使用步骤



Fluent 软件程序具有如下模拟能力。

- ☑ 无黏流、层流、湍流模型。
- ☑ 适用于牛顿流体、非牛顿流体。
- ☑ 强制/自然/混合对流的热传导，固体/流体的热传导、辐射。
- ☑ 化学组分的混合/反应。
- ☑ 自由表面流模型，欧拉多相流模型，混合多相流模型，颗粒相模型，空穴两相流模型，湿蒸汽模型，融化/熔化/凝固。
- ☑ 蒸发/冷凝相变模型。
- ☑ 离散相的拉格朗日跟踪计算。
- ☑ 非均质渗透性、惯性阻抗、固体热传导，多孔介质模型（考虑多孔介质压力突变）。
- ☑ 风扇、散热器，以热交换器为对象的集中参数模型。
- ☑ 基于精细流场解算的预测流体噪声的声学模型。
- ☑ 质量、动量、热、化学组分的体积源项。
- ☑ 复杂表面形状下的自由面流动。
- ☑ 磁流体模块主要模拟电磁场和导电流体之间的相互作用问题。
- ☑ 连续纤维模块主要模拟纤维和气体流动之间的动量、质量以及热的交换问题等。

2. Fluent 软件的特点

提供了非常灵活的网格特性，如三角形、四边形、四面体、六面体、金字塔形网格，如图 2-2 所示。

- ☑ Fluent 使用 Gambit 作为前处理软件，读取多种 CAD 软件的三维几何模型以及多种 CAE 软件的网格模型。Fluent 可用于二维平面、二维轴对称和三维流动分析，可完成多种参考体系下流场模拟、定常和非定常流动分析、不可压流和可压流计算、层流和湍流模拟、传热和热混合分析、化学组分混合和反应分析、多相流分析、固体与流体耦合传热分析、多孔介质分析等，它的湍流模型包括 $k-\varepsilon$ 模型、Reynolds 应力模型、LES 模型、标准壁面函数、双层近壁模型等。

- ☑ Fluent 可以自定义多种边界条件，例如，流动入口以及出口边界条件、壁面边界条件等，可采用多种局部的笛卡儿和圆柱坐标系的分量输入，所有边界条件均可以随空间和时间变化，包括轴对称和周期变化等。Fluent 提供的用户自定义子程序功能，可让用户自行设定连续方程、动量方程、能量方程或组分输运方程中的体积源项，自定义边界条件、初始条件、流动的物理性，添加新的标量方程和多孔介质模型等。
- ☑ Fluent 是用 C 语言编写的，可实现动态内存分配及高效的并行数据结构，具有很大的灵活性与很强的处理能力。此外，Fluent 使用 Client/Server 结构，允许在用户桌面工作站和强有力的服务器上同时分离地运行程序。
- ☑ Fluent 解的计算与显示可以通过交互式的用户界面来完成。用户界面是通过 Scheme 语言写成的。高级用户可以通过写菜单宏及菜单函数自定义及优化界面，还可以使用基于 C 语言的用户自定义函数功能对 Fluent 进行扩展。

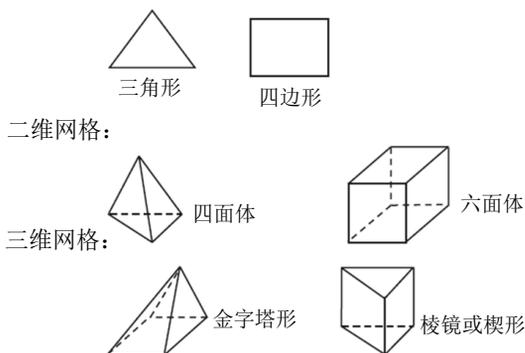


图 2-2 Fluent 的网格特性



此外, Fluent 2022 还具有如下特点。

- ☑ 可以方便设置惯性或非惯性坐标系、复数基准坐标系、滑移网格以及动静翼互相作用模型化后的连续界面。
- ☑ 内部集成丰富的物性参数数据库, 含有大量的材料可供选用, 用户可以方便地自定义材料。
- ☑ 具有高效率的并行计算功能, 提供多种自动/手动分区算法; 内置 MPI 并行计算机制可大幅度提高并行效率。
- ☑ 拥有友好的用户界面, 提供了二次开发接口 (UDF)。
- ☑ 含有后处理和数据输出功能, 可以对计算结果进行处理, 生成可视化图形以及相应的曲线、报表等。



Note

2.3 Fluent 的系统要求和启动

Fluent 包含在 Ansys 中, 所以系统要求与 Ansys 2022 的系统要求相同。

2.3.1 系统要求

1. 操作系统要求

(1) Ansys Workbench 2022 R1 可运行于 Linux x64 (linux64)、Windows x64 (winx64) 等计算机及操作系统中, 其数据文件是兼容的, Ansys Workbench 2022 R1 不支持 32 位系统。

(2) 确定计算机安装有网卡、TCP/IP, 并将 TCP/IP 绑定到网卡上。

2. 硬件要求

(1) 内存: 16 GB (推荐 32 GB) 以上。

(2) 硬盘: 60 GB 以上硬盘空间, 用于安装 Ansys 软件及其配套软件。

(3) 显示器: 支持 1024×768、1366×768 或 1280×800 分辨率的显示器, 一些应用会建议使用高分辨率, 例如, 1920×1080 或 1920×1200 分辨率; 可显示 24 位以上颜色显卡。

(4) 介质: 可网络下载或 USB 储存安装。

2.3.2 Fluent 软件的启动

Fluent 的启动包括直接启动和通过 Ansys Workbench 中的“流体流动 (Fluent)”项目模块来启动。

1. 直接启动

选择“开始”→“Ansys 2022 R1”→“Fluent 2022 R1”命令, 如图 2-3 所示, 打开“Fluent Launcher 2022 R1”启动器, 如图 2-4 所示。在启动器中设置分析的是二维问题 (2D) 或者三维问题 (3D), 设置计算精度 (单精度或者双精度) 等参数后, 单击启动器中的“Start”按钮, 启动 Fluent。

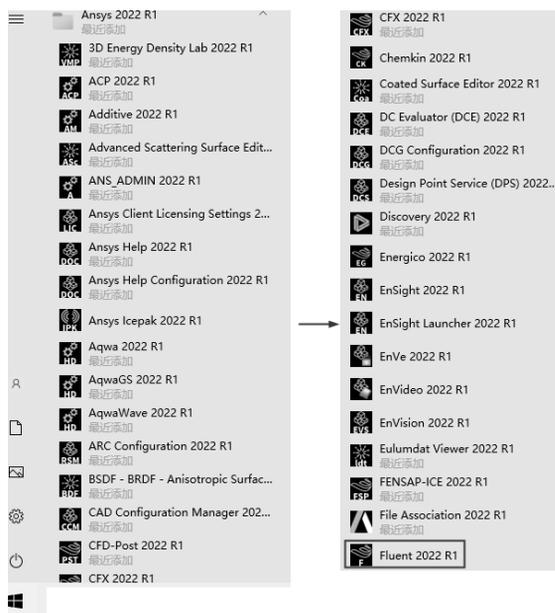


图 2-3 “开始”菜单启动 Fluent



Note

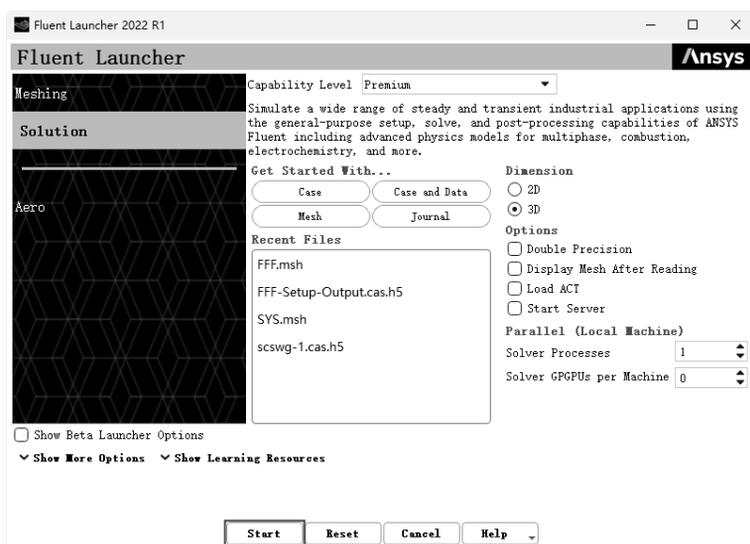


图 2-4 “Fluent Launcher 2022 R1” 启动器

2. 在 Workbench 中启动

01 选择“开始”→“Ansys 2022 R1”→“Workbench 2022 R1”命令，打开 Workbench 主界面，如图 2-5 所示。

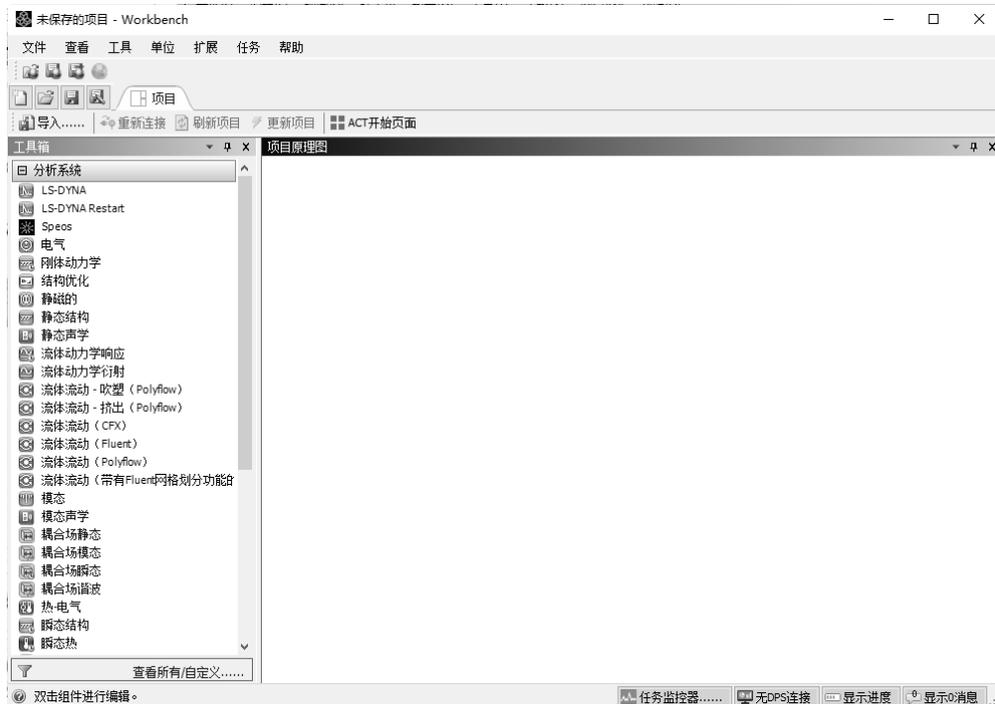


图 2-5 Workbench 主界面

02 展开左边工具箱中的“分析系统”栏，将“流体流动（Fluent）”选项拖曳到“项目原理图”界面中或双击“流体流动（Fluent）”选项，建立一个含有“流体流动（Fluent）”的项目模块，如图 2-6 所示。



Note



图 2-6 创建“流体流动 (Fluent)”项目

03 右击“流体流动 (Fluent)”项目模块中的“几何结构”栏，在弹出的快捷菜单中选择“新的 SpaceClaim 几何结构”命令、“新的 DesignModeler 几何结构”命令或者“新的 Discovery 几何结构”命令，创建几何模型；也可以选择“导入几何模型”命令，导入几何模型，如图 2-7 所示。

04 导入模型后，右击“流体流动 (Fluent)”项目模块中的“网格”栏，在弹出的快捷菜单中选择“编辑”命令，如图 2-8 所示，启动 Meshing 程序，划分网格，也可以选择“导入网格文件”命令，导入已经划分好网格的文件，这样就可以跳过建模过程。



图 2-7 创建或导入几何模型



图 2-8 划分网格或导入网格模型

05 划分好网格或导入网格文件后，右击“流体流动 (Fluent)”项目模块中的“设置”栏，在弹出的快捷菜单中选择“编辑”命令，如图 2-9 所示，打开“Fluent Launcher 2022 R1 (Setting Edit Only)”



启动器,如图 2-10 所示,在启动器中会根据前面创建或导入的几何模型自动选择二维(2D)或三维(3D)分析,在设置计算精度(单精度或者双精度)等参数后,单击启动器中的“Start”按钮,启动 Fluent。



图 2-9 Workbench 启动 Fluent

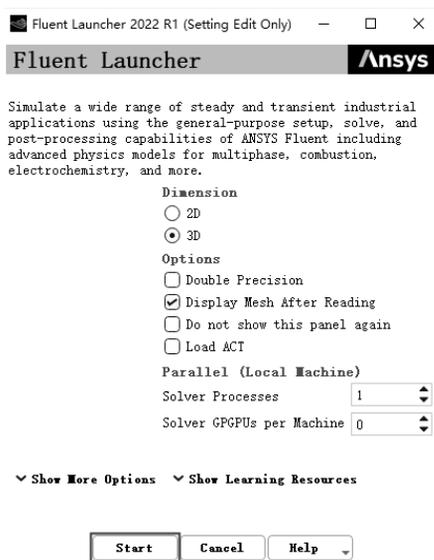


图 2-10 “Fluent Launcher 2022 R1 (Setting Edit Only)” 启动器



Note

2.4 Fluent 的功能特点和分析过程

Fluent 的主要功能特点有:多种数值算法和先进的物理模型。

2.4.1 数值算法

Fluent 软件采用有限体积分法,提供了 3 种数值算法,具体如下。

1. 非耦合隐式算法

该算法适用于不可压缩流动和中等可压缩流动,不对 N-S 方程联立求解,而是对动量方程进行压力修正。该算法是一种很成熟的算法,在应用上经过了广泛的验证。这种算法拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合,适用于低速流动的 CFD 模拟。

2. 耦合显示算法

该算法由 Fluent 公司与 NASA 联合开发,与 SIMPLE 算法不同,该算法是对整个 N-S 方程组进行联立求解,空间离散采用通量差分分裂格式,时间离散采用多步 Runge-Kutta 格式,并采用了多重网格加速收敛技术。对于稳态计算,还采用了当地时间步长和隐式残差光滑技术。该算法稳定性好,内存占用较少,应用极为广泛。

3. 耦合隐式算法

该算法也对 N-S 方程组进行联立求解,由于采用隐式格式,因此计算精度和收敛性较耦合显示算法要好,但占用内存较多。该算法还有一个优点就是可以对从低速流动到高速流动的全速范围内进行求解。



2.4.2 物理模型

Fluent 软件含有丰富的物理模型，有黏性模型、多相流模型、辐射模型、组分模型、离散相模型以及凝固和熔化模型，具体如下。

1. 黏性模型

Fluent 提供了 11 种黏性模型：无黏模型、层流模型、Spalart-Allmaras (1 eqn) 模型、k-epsilon (2 eqn) 模型、k-omega (2 eqn) 模型、转捩 k-kl-omega (3 eqn) 模型、转捩 SST (4 eqn) 模型、雷诺应力模型 (RSM-7 eqn)、尺度自适应模型 (SAS)、分离涡模拟模型 (DES) 和大涡模拟模型 (LES)。其中，大涡模拟模型只对三维问题有效。在“概要视图”中的“模型”列表中双击“黏性”按钮, 可在“物理模型”选项卡“模型”面板中单击“黏性”按钮, 弹出“黏性模型”对话框，如图 2-11 所示。默认状态下，“黏性模型”对话框的“无黏”单选按钮处于选中状态。



图 2-11 “黏性模型”^①对话框

- 无黏模型：进行无黏流计算。
- 层流模型：层流模拟。
- Spalart-Allmaras (1 eqn) 模型：用于求解动力黏输运方程，该模型专门为涉及壁面边界流动的航空、航天应用领域而设计的，并已被证明对受到逆压力梯度作用的边界层具有良好的效果。该模型在旋转机械领域的应用也越来越普遍。
- k-epsilon (2 eqn) 模型：该模型又分为 Standard 模型、RNG 模型和 Realizable 模型 3 种。Standard 模型忽略分子间黏性，只适用于完全湍流；RNG 模型考虑湍流漩涡，其湍流 Prandtl 数为解析公式（而非常数），考虑低雷诺数黏性等，故而对于瞬变流和流线弯曲有很好的表现；Realizable 模型提供旋流修正，对旋转流动、流动分离有很好的表现。
- k-omega (2 eqn) 模型：该模型可以进行湍流计算，分为 Standard 模型、GEKO 模型、BSL 模型和 SST 模型。Standard 模型主要应用于壁面约束流动和自由剪切流动；GEKO 模型的目标是提供一个具有足够灵活的单一模型，以覆盖广泛的应用，是一个强大的模型优化工具，但是需要正确理解这些系数的影响，以避免失调；BSL 模型有效地将近壁区域的稳健且精确的模型公式与远场自由流无关的模型公式融合在一起；SST 模型在近壁面区有更高的精度和更好的算法稳定性。
- 转捩 k-kl-omega (3 eqn) 模型：用于模拟层流向湍流的转捩过程。
- 转捩 SST (4 eqn) 模型：该模型基于 k-omega (2 eqn) 模型中的 SST 模型开发的，额外添加了两个用于求解转捩过程的方程，计算量要比 SST 模型大。
- 雷诺应力 (RSM-7 eqn) 模型：该模型是精细制作的湍流模型，可用于飓风流动、燃烧室高速旋转流、管道中二次流等。
- 尺度自适应模型 (SAS)：该模型是优先推荐的尺度解析模型，适用于强旋流、混合流、钝体绕流等 Fluent 求解模拟。
- 分离涡模拟 (DES) 模型：该模型是近年来出现的一种结合雷诺平均方法和大涡数值模拟两者优点的湍流模拟方法。采用基于 Spalart-Allmaras 方程模型的 DES 方法，数值求解 N-S 方程，模拟绕流发生分离后的旋涡运动。其中，空间区域离散采用有限体积法，方程空间项和

^① 文中的“黏性”与图中的“粘性”为同一内容，后文不再赘述。





时间项的数值离散分别采用 Jameson 中心格式和双时间步长推进方法。通过模拟圆柱绕流以及翼型失速绕流，可以观察到与物理现象一致的旋涡结构，得到与实验数据相吻合的计算结果。

☑ 大涡模拟（LES）模型：该模型只对三维问题有效。

2. 多相流模型

Fluent 提供了 3 种多相流模型：VOF（volume of fluid）模型、Mixture（混合）模型和欧拉（Eulerian）模型。在“概要视图”中的“模型”列表中双击“多相流”按钮, 也可以在“物理模型”选项卡“模型”面板中单击“多相流”按钮, 弹出“多相流模型”对话框，如图 2-12 所示。默认状态下，“多相流模型”对话框的“关闭”单选按钮处于选中状态。



图 2-12 “多相流模型”对话框

(1) VOF 模型。

该模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的容积比来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体。典型的应用包括流体喷射、流体中气泡运动、流体在大坝坝口的流动。气液界面的稳态和瞬态处理等，如图 2-13 所示。

(2) Mixture 模型。

该模型用于模拟各相有不同速度的多相流，但是假定了在短空间尺度上局部的平衡。典型的应用包括沉降、气旋分离器、低载荷作用下的多粒子流动、气相容积率很低的泡状流，如图 2-14 所示。

(3) 欧拉模型。

该模型可模拟多相分流及相互作用的相，与离散相模型中 Eulerian-Lagrangian 方案只可用于离散相不同，在多相流模型中欧拉可用于模型中的每一相，如图 2-15 所示。



图 2-13 VOF 模型



图 2-14 Mixture 模型



图 2-15 欧拉模型

3. 辐射模型

Fluent 提供了 6 种辐射模型：Rosseland 模型、P1 模型、Discrete Transfer (DTRM) 模型、表面到表面 (S2S) 模型、离散坐标 (DO) 模型、Monte Carlo (MC) 模型。在“概要视图”中的“模型”列表中双击“辐射”按钮, 也可在“物理模型”选项卡“模型”面板中单击“辐射”按钮, 弹出



Note



Note

“辐射模型”对话框，如图 2-16 所示。辐射模型可用于火焰辐射传热、表面辐射传热、导热、对流与辐射的耦合问题、采暖、通风等。

- Rosseland 模型**：该模型不会求解额外的关于入射、辐射的传输方程，因此该模型计算速度快，节省内存。但该模型只能用于光学深度比较大的情况，当光学深度大于 3 时优先使用该模型，并且该模型不能用于密度基求解器。
- P1 模型**：该模型为一个扩散方程，考虑了扩散效应，因此求解占用较小的内存，尤其当求解光学深度比较大时（如燃烧应用）。但该模型也存在一定的限制条件：该模型假定所有的表面均为散射，且假定基于灰体辐射；当光学深度很小时，求解的精度会降低。
- Discrete Transfer (DTRM) 模型**：该模型可用于光学深度非常大的情况，模型较为简单，可以通过增加射线数量来提高计算精度，但需要占用较大的内存。使用该模型的限制条件为假定所有表面都是散射的，但不包括散射效应，且假定基于灰体辐射；不能与非共形交界面或滑移网格同时使用，不能用于并行计算。
- 表面到表面 (S2S) 模型**：该模型适用于封闭空间中没有介质的辐射问题（如太空空间站的排热系统，太阳能的收集系统等）。使用该模型的限制条件为假定所有表面都是散射的，且假定基于灰体辐射；不能用于有介质参与的辐射问题；不能用于含有周期边界的模型；不能用于含有对称边界的问题；不支持非共形交界面、悬挂节点或网格自适应。
- 离散坐标 (DO) 模型**：该模型应用广泛，它能够求解所有光学深度区间的辐射问题；能求解燃烧问题中面对面的辐射问题，计算速度和占用内存都比较适中。
- Monte Carlo (MC) 模型**：该模型能够解决从光学薄区域（透明区域）到光学厚区域（扩散区域）的问题（如燃烧问题）。该模型计算准确，但占用的内存较大，计算时间长。该模型可用于求解壳传导问题、周期性边界问题、瞬态辐射问题、热交换器问题。



图 2-16 “辐射模型”对话框

4. 组分模型^①

在“概要视图”中的“模型”列表中双击“组分”按钮, 也可在“物理模型”选项卡“模型”面板中单击“组分”按钮, 弹出“组分模型”对话框，如图 2-17 所示。组分模型主要用于对化学组分的输运和燃烧等化学反应进行的模拟。

- 组分传递模型**：通用有限速率模型。
- 非预混燃烧模型**：主要用于模拟湍流扩散火焰设计。
- 预混合燃烧模型**：主要用于完全预混合的燃烧系统。
- 部分预混合燃烧模型**：用于非预混燃烧和完全预混燃烧结合的系统。
- 联合概率密度输运模型**：该模型可用于预混、非预混及部分预混火焰中。



图 2-17 “组分模型”对话框

5. 离散相模型

在“概要视图”中的“模型”列表中双击“离散相”按钮, 也可在“物理模型”选项卡“模型”面板中单击“离散相”按钮, 弹出“离散相模型”对话框，如图 2-18 所示。离散相模型主要用于预测连续相中由于湍流漩涡作用而对颗粒造成的影响，离散相的加热或冷却，液滴的蒸发与沸腾、

^① 文中的“组分”与图中的“组份”为同一内容，后文不再赘述。



崩裂与合并，模拟煤粉燃烧等。

6. 凝固和熔化模型

在“概要视图”中的“模型”列表中双击“凝固和熔化”按钮, 也可在“物理模型”选项卡“模型”面板中单击“更多”下拉列表中的“熔化...”按钮, 弹出“凝固和熔化”对话框, 如图 2-19 所示。如果要进行有关凝固和熔化的计算, 需要选中“凝固/熔化”单选按钮, 给出“糊状区域参数”值, 一般为 $10^4 \sim 10^7$ 。



Note



图 2-18 “离散相模型”对话框



图 2-19 “凝固和熔化”对话框

2.4.3 Fluent 的应用

基于强大的功能特点, Fluent 在很多领域得到了广泛应用, 主要有以下几个方面。

- 水轮机、风机和泵等流体内部的流体流动。
- 汽车工业的应用。
- 换热器性能分析及换热器形状的选取。
- 飞机和航天器等飞行器的设计。
- 洪水波及河口潮流计算。
- 风载荷对高层建筑物稳定性的影响。
- 温室及室内空气流通分析。
- 电子元器件冷却分析。
- 河流中污染物的扩散分析。
- 建筑设计和火灾研究。

2.4.4 Fluent 的分析过程

当使用 Fluent 解决某一问题时, 首先要考虑如下几个问题。

(1) 定义模型目标: 从 CFD 模型中需要得到的结果, 从模型中需要得到的精度。选择计算模型: 如何隔绝所需要模拟的物理系统, 计算区域的起点和终点是什么? 在模型的边界处使用什么样的边界条件? 二维问题还是三维问题? 什么样的网格拓扑结构适合解决问题?

(2) 物理模型的选取: 层流还是湍流? 定常还是非定常? 可压流还是不可压流? 是否需要应用其他的物理模型?

(3) 确定解的程序: 问题可否简化? 是否使用默认的解的格式与参数值? 采用哪种解格式可以



加速收敛？使用多重网格计算机的内存是否够用？得到收敛解需要多长时间？

(4) 具体解决问题的步骤。

第一步，需要几何结构的模型以及生成网格。可以使用 GAMBIT 或者分离的 CAD 系统产生几何结构模型及网格；也可以用 Tgrid 从已有的面网格中产生体网格，或者从相关的 CAD 软件包生成体网格，然后读入 Tgrid 或者 Fluent。

第二步，启动 Fluent 解算器。各步骤需要操作的菜单如表 2-1 所示。利用 Fluent 软件进行求解的具体步骤如下。

- ① 确定几何形状，生成计算网格（可在 Workbench 中生成，也可以读入其他制定程序生成的网格）。
- ② 输入并检查网格。
- ③ 选择求解器（2D 或 3D 等）。
- ④ 选择求解的方程：层流或湍流（或者无黏流）、化学组分或化学反应、传热模型等。确定其他需要的模型，如风扇、热交换器、多孔介质等。
- ⑤ 确定流体的物性参数。
- ⑥ 确定边界类型以及其边界条件。
- ⑦ 条件计算控制参数。
- ⑧ 流场初始化。
- ⑨ 求解计算。
- ⑩ 保存结果，进行后处理等。

表 2-1 Fluent 菜单概述

解的步骤	菜单
读入网格	文件菜单
检查网格	网格菜单
选择解算器格式	定义菜单（define menu）
选择基本方程	定义菜单
物性参数	定义菜单
边界条件	定义菜单
调整解的控制	解菜单（solve menu）
初始化流场	解菜单
计算解	解菜单
结果的检查	显示菜单（display menu）或绘图菜单（plot menu）或报告菜单（report menu）
保存结果	文件菜单
网格适应	适应菜单

(5) Fluent 的求解器：包括 Fluent 2d（二维单精度求解器）、Fluent 3d（三维单精度求解器）、Fluent 2ddp（二维双精度求解器）、Fluent 3ddp（三维双精度求解器）等。

(6) Fluent 求解方法的选择：包括非耦合求解方法和耦合求解方法。非耦合求解方法主要用于不可压缩流动或者低马赫数压缩性流体的流动。耦合求解方法则用于高速可压流动。

Fluent 默认设置为非耦合求解，但对于高速可压流动，或者需要考虑体积力（浮力或者离心力）的流动。求解问题时网格要密，建议采用耦合隐式求解方法求解能量和动量方程，可较快地得到收敛解，缺点是需要的内存比较大（是非耦合求解迭代时间的 1.5~2.0 倍）。如果必须进行耦合求解，但是内存不够，则用户可以考虑使用耦合显式解法器求解。该解法器也耦合了动量、能量和组分方程，且占用的内存要比隐式求解方法小，但缺点是收敛时间比较长。

