



视频讲解

技能应用速成系列

Fluent技能速成，本书足矣！

升级版

ANSYS Fluent 15.0

流体计算 | 从入门到精通

内容全面、案例丰富

基础操作→专题技能→实例应用→举一反三。

CAX技术联盟

郑力铭 编著

讲解细致、综合应用

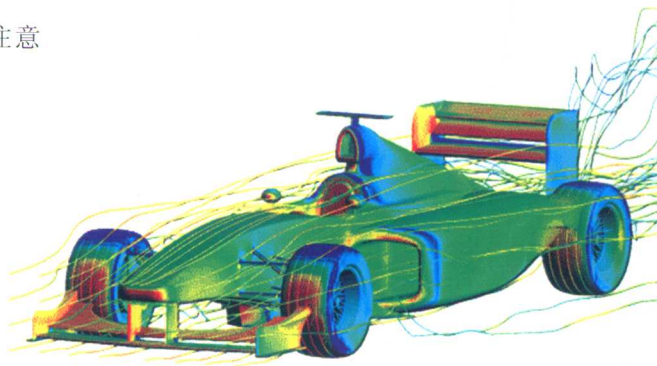
通过案例详细讲解分析流程、方法、技巧、注意事项，再到综合应用。

网络服务、博客答疑

超值素材资源、网络支持。

网络服务：<http://www.catics.org/3120>

博客答疑：<http://blog.sina.com.cn/caxbook>



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

技能应用速成系列

ANSYS Fluent 15.0 流体计算 从入门到精通

CAX 技术联盟

郑力铭 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

Fluent 软件是目前国际上比较流行的商业 CFD 软件, 只要涉及流体、热传递及化学反应等的工程问题, 都可以用 Fluent 进行求解。

全书分为三部分共 18 章, 由浅入深地讲解了 Fluent 仿真计算的各种功能。第一部分为基础部分(第 1~6 章), 包括计算流体的基础理论与方法、划分网格、Fluent 求解设置、结果后处理等功能的介绍; 第二部分(第 7~11 章)针对 Fluent 的具体物理模型给出了相应的案例, 包括动网格模型、燃烧模型、多相流模型以及离散相模型的数值模拟等; 第三部分(第 12~18 章)针对每个行业 Fluent 可以解决的流体仿真计算问题进行详细的讲解, 涉及建筑、机械工程、航空航天、水利海洋工程、车辆工程、能源化工及电器等行业的应用。

本书结构严谨, 条理清晰, 重点突出, 非常适合 Fluent 初中级读者学习使用, 既可作为大中专院校理工科相关专业学生学习用书, 也可作为工程技术人员的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS Fluent 15.0 流体计算从入门到精通 / CAX 技术联盟, 郑力铭编著. —北京: 电子工业出版社, 2015.3
(技能应用速成系列)

ISBN 978-7-121-25546-5

I. ①A… II. ①C… ②郑… III. ①工程力学—流体力学—有限元分析—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 030107 号

策划编辑: 许存权

责任编辑: 许存权 特约编辑: 冯彩茹

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 33.75 字数: 860 千字

版 次: 2015 年 3 月第 1 版

印 次: 2015 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 元(含 DVD 光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



前言

Fluent 具有丰富的物理模型、先进的数值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/聚集、多相流、管道流动等。

Fluent 可计算的物理问题包括可压与不可压流体、耦合传热、热辐射、多相流、粒子输送过程、化学反应和燃烧问题。还拥有诸如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等大批复杂现象的使用模型。

本书以最新版 Fluent 15.0 为软件版本进行编写，该版本较以前的版本在性能方面有了一定的改善，克服了以前版本中一些不尽如人意的地方。

1. 本书特色

- 详略得当。本书在编写过程中遵循的原则是，将编者十多年的 CFD 经验结合 Fluent 软件的各项功能，从点到面，把基本知识详细地讲解给读者。
- 信息量大。本书包含的内容全面，读者在学习的过程中不应只关注细节，还应从整体出发，了解 CFD 的分析流程，需要关注它包括什么内容，注意些什么细节。
- 结构清晰。本书结构清晰、由浅入深，从结构上主要分为基础部分和案例部分两大类，在讲解基础知识的过程中穿插对实例的讲解，在综合介绍的过程中也同步回顾重点基础知识。

2. 本书内容

本书基于 Fluent 15.0 版本编写而成，分为三部分：第一部分为基础知识，第二部分为功能应用，是根据 Fluent 相关计算模型而编写的计算实例，第三部分为行业应用，是根据 Fluent 的应用领域而编写的计算实例。通过以上三个部分的介绍，可使读者对 Fluent 15.0 新版本有充分的认识和理解，从而快速掌握新版本的应用。

第一部分：基础知识。主要介绍计算流体力学的理论知识以及 Fluent 15.0 版本的基本操作及后处理的相关知识。内容涉及流体力学的发展以及流体力学的基本物理定律、CFD 商业软件及其各自的特点、网格划分技术、Fluent 软件内的求解过程和后处理等相关知识。

第 1 章 流体力学基础

第 2 章 计算流体力学基础

第 3 章 Fluent 简介

第 4 章 生成网格

第 5 章 Fluent 计算设置

第 6 章 计算结果后处理

第二部分：功能应用。根据 Fluent 软件的功能而专门定制的算例，主要从 Fluent 所能求解的实际物理问题入手，给出其具体的计算算例。主要内容包活动网格模型、燃烧模型、

多相流模型以及离散相模型，在讲解过程中，各个模型并不是相互独立的，而是相互穿插的，如动网格模型的算例中还包括两相流模型及传热模型。

第 7 章 动网格问题的数值模拟

第 8 章 组分传输与燃烧

第 9 章 多孔介质数值模拟

第 10 章 多相流模型

第 11 章 离散相的数值模拟

第三部分：行业应用。通过具体的各个行业来讲解 Fluent 软件的应用。主要内容包括 Fluent 软件在建筑、机械工程、航空航天、水利海洋工程、车辆工程、能源化工及电器等相关行业中的应用。

第 12 章 建筑行业中的应用

第 13 章 机械行业中的应用

第 14 章 航空航天行业中的应用

第 15 章 水利海洋工程中的应用

第 16 章 汽车行业中的应用

第 17 章 能源化工中的应用

第 18 章 电器行业中的应用

配套光盘提供了本书中所有案例的源文件，读者可以使用 Fluent 打开相应的源文件，根据本书的介绍进行学习。

3. 读者对象

本书适合 Fluent 初学者和期望提高利用 Fluent 进行流体仿真分析计算能力的读者，具体包括如下。

★ 相关从业人员

★ 初学 Fluent 的工程技术人员

★ 大中专院校理工科在校学生

★ 相关培训机构的教师和学员

★ 参加工作实习的“菜鸟”

★ Fluent 爱好者

4. 本书作者

本书主要由郑力铭编写，另外，参与编写的人员还有：张明明、吴光中、魏鑫、石良臣、刘冰、林晓阳、唐家鹏、丁金滨、王菁、吴永福、张小勇、温正、李昕、刘成柱、乔建军、张迪妮、张岩、温光英、郭海霞、王芳。虽然作者在编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处，请读者及各位同行批评指正，在此表示诚挚的谢意。

5. 读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到 caxbook@126.com，或访问作者博客 <http://blog.sina.com.cn/caxbook>，编者会尽快给予解答，我们将竭诚为您服务。

编者



目 录

第一部分 基础知识

第 1 章 流体力学基础	1	3.7 本章小结	40
1.1 基本概念	2	第 4 章 生成网格	41
1.2 流体流动的分类	5	4.1 网格生成概述	42
1.3 边界层和物体阻力	5	4.2 ANSYS ICEM CFD 网格划分	43
1.4 层流和湍流	7	4.3 ANSYS Fluent 的 Meshing 网格划分	85
1.5 流体流动的控制方程	7	4.4 GAMBIT 网格划分	90
1.6 边界条件	8	4.5 本章小结	100
1.7 流体力学专业词汇	10	第 5 章 Fluent 计算设置	101
1.8 本章小结	12	5.1 网格导入与工程项目保存	102
第 2 章 计算流体力学基础	13	5.2 设置求解器及操作条件	109
2.1 计算流体力学的发展	14	5.3 物理模型设定	112
2.2 计算流体力学的求解过程	15	5.4 材料性质设定	122
2.3 数值模拟方法和分类	15	5.5 边界条件设定	126
2.4 有限体积法的基本思想	17	5.6 求解控制参数设定	146
2.5 有限体积法的求解方法	18	5.7 初始条件设定	149
2.6 计算流体力学应用领域	19	5.8 求解设定	151
2.7 本章小结	20	5.9 本章小结	157
第 3 章 Fluent 简介	21	第 6 章 计算结果后处理	158
3.1 Fluent 概述	22	6.1 Fluent 后处理功能	159
3.2 Fluent 的软件结构	22	6.2 CFD-Post 后处理器	164
3.3 Fluent 软件特点	31	6.3 TECPLOT 使用介绍	184
3.4 Fluent 求解步骤	33	6.4 本章小结	190
3.5 Fluent 使用的文件类型	35		
3.6 Fluent 15.0 新功能介绍	35		

第二部分 功能应用

第 7 章 动网格问题的数值模拟	191	第 9 章 多孔介质数值模拟	271
7.1 动网格问题概述	192	9.1 多孔介质模型概述	272
7.2 齿轮泵的动态模拟	193	9.2 多孔介质燃烧的数值模拟	273
7.3 水波的动态模拟	205	9.3 本章小结	280
7.4 钻头运动的动态模拟	214	第 10 章 多相流模型	281
7.5 本章小结	226	10.1 多相流概述	282
第 8 章 组分传输与燃烧	227	10.2 气穴现象的数值模拟	284
8.1 组分传输与燃烧概述	228	10.3 水中气泡破碎过程的数值模拟	293
8.2 爆炸燃烧的数值模拟	230	10.4 本章小结	303
8.3 石油燃烧的数值模拟	238	第 11 章 离散相的数值模拟	304
8.4 燃气炉内燃烧的数值模拟	251	11.1 离散相模型概述	305
8.5 壁面反应数值模拟	262	11.2 喷雾干燥过程的数值模拟	306
8.6 本章小结	270	11.3 弯管磨损的数值模拟	317
		11.4 本章小结	326

第三部分 行业应用

第 12 章 建筑行业中的应用	327	15.2 凸台绕流	417
12.1 高层建筑室外通风数值模拟	328	15.3 本章小结	437
12.2 室内通风模拟分析	338	第 16 章 汽车行业中的应用	438
12.3 本章小结	350	16.1 催化转换器内多孔介质流动	439
第 13 章 机械行业中的应用	351	16.2 车灯传热分析	452
13.1 阀门运动	352	16.3 本章小结	469
13.2 风力涡轮机分析	364	第 17 章 能源化工中的应用	470
13.3 本章小结	375	17.1 反应器内粒子流动	471
第 14 章 航空航天行业中的应用	376	17.2 表面化学反应模拟	481
14.1 火箭发射	377	17.3 本章小结	499
14.2 机翼超音速流动	395	第 18 章 电器行业中的应用	500
14.3 本章小结	407	18.1 芯片传热分析	501
第 15 章 水利海洋工程中的应用	408	18.2 固体燃料电池分析	518
15.1 自由表面流动	409	18.3 本章小结	534

第一部分 基础知识

第1章

流体力学基础

流体力学是研究流体（液体和气体）的力学运动规律及其应用的学科，主要研究在各种力的作用下流体本身的状态，以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动形态之间的相互作用的力学分支。流体力学是力学的一个重要分支，它主要研究流体本身的静止状态和运动状态，以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律，在生活、环保、科学技术及工程中具有重要的应用价值。

学习目标

- (1) 了解流体流动的基本概念。
- (2) 掌握流体力学的基础理论。
- (3) 掌握流体流动的控制方程。



Note

1.1 基本概念

(1) 流体的密度：是单位体积内所含物质的多少。若密度是均匀的，则有：

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

式中： ρ 为流体的密度； M 是体积为 V 的流体所含物质的质量。

由上式可知，密度的单位是 kg/m^3 。对于密度不均匀的流体，其某一点处密度的定义为：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-2)$$

例如，零下 4°C 时水的密度为 1000 kg/m^3 ，常温 20°C 时空气的密度为 1.24 kg/m^3 。

各种流体的具体密度值可查阅相关文献。

提示：流体的密度是流体本身固有的物理量，它随着温度和压强的变化而变化。

(2) 流体的重度：流体的重度与流体的密度有一个简单的关系式，即：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中： g 为重力加速度，其值为 9.81 m/s^2 。流体的重度单位为 N/m^3 。

(3) 流体的比重：为该流体的密度与零下 4°C 时水的密度之比。

(4) 流体的粘性：在研究流体流动时，若考虑流体的粘性，则称为粘性流动，相应地称流体为粘性流体；若不考虑流体的粘性，则称为理想流体的流动，相应地称流体为理想流体。

流体的粘性可由牛顿内摩擦定律表示：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

说明：牛顿内摩擦定律适用于空气、水、石油等大多数机械工业中的常用流体。凡是符合切应力与速度梯度成正比的流体称为牛顿流体，即严格满足牛顿内摩擦定律且 μ 保持为常数的流体，否则就称其为非牛顿流体。例如，溶化的沥青、糖浆等流体均属于非牛顿流体。

非牛顿流体有以下三种不同的类型。

① 塑性流体，如牙膏等，他们有一个保持不产生剪切变形的初始应力 τ_0 ，只有克服了初始应力，其切应力才与速度梯度成正比，即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

② 假塑性流体，如泥浆等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1-6)$$

③ 胀塑性流体，如乳化液等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n > 1) \quad (1-7)$$



Note

(5) 流体的压缩性：是指在外界条件变化时，其密度和体积发生了变化。这里的条件有两种，一种是外部压强发生了变化，另一种是流体的温度发生了变化。

流体的等温压缩率为 β ，当质量为 M ，体积为 V 的流体外部压强发生 Δp 的变化时，相应地其体积也发生了 ΔV 的变化，则定义流体的等温压缩率为：

$$\beta = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \quad (1-8)$$

这里的负号是考虑到 Δp 与 ΔV 总是符号相反的缘故； β 的单位为 $1/\text{Pa}$ 。流体等温压缩率的物理意义为当温度不变时，每增加单位压强所产生的流体体积的相对变化率。

考虑到压缩前后流体的质量不变，上式还有另外一种表示形式，即：

$$\beta = \frac{d\rho}{\rho dp} \quad (1-9)$$

气体的等温压缩率可由气体状态方程求得：

$$\beta = 1/p \quad (1-10)$$

流体的体积膨胀系数为 α ，当质量为 M ，体积为 V 的流体温度发生 ΔT 的变化时，相应地其体积也发生了 ΔV 的变化，则定义流体的体积膨胀系数为：

$$\alpha = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} \quad (1-11)$$

考虑到膨胀前后流体的质量不变，上式还有另外一种表示形式，即：

$$\alpha = -\frac{d\rho}{\rho dT} \quad (1-12)$$

这里的负号是考虑到随着温度的增高，体积必然增大，则密度必然减小； α 的单位为 $1/\text{K}$ 。体积膨胀系数的物理意义为当压强不变时，每增加单位温度所产生的流体体积的相对变化率。

气体的体积膨胀系数可由气体状态方程求得：

$$\alpha = 1/T \quad (1-13)$$

在研究流体流动过程时，若考虑到流体的压缩性，则称为可压缩流动，相应地称流体为可压缩流体，例如相对速度较高的气体流动。

若不考虑流体的压缩性，则称为不可压缩流动，相应地称流体为不可压缩流体，如水、油等液体的流动。

(6) 液体的表面张力：液体表面相邻两部分之间的拉应力是分子作用力的一种表现。液面上的分子受液体内部分子吸引而使液面趋于收缩，表现为液面任何两部分之间具有拉应力，称为表面张力，其方向和液面相切，并与两部分的分界线相垂直。

单位长度上的表面张力用 σ 表示，单位是 N/m。

(7) 质量力和表面力：作用在流体微团上的力可分为质量力与表面力。

质量力：与流体微团质量大小有关并且集中作用在微团质量中心上的力称为质量力。如在重力场中的重力 mg ，直线运动的惯性力 ma 等。

质量力是一个矢量，一般用单位质量所具有的质量力来表示，其形式如下：

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \quad (1-14)$$

式中： f_x 、 f_y 、 f_z 为单位质量力在 x 、 y 、 z 轴上的投影，或简称为单位质量分力。

表面力：大小与表面面积有关而且分布作用在流体表面上的力称为表面力。表面力按其作用方向可以分为两种：一是沿表面内法线方向的压力，称为正压力；另一种是沿表面切向的摩擦力，称为切应力。

作用在静止流体上的表面力只有沿表面内法线方向的正压力，单位面积上所受到的表面力称为这一点处的静压强。静压强有两个特征：

- ① 静压强的方向垂直指向作用面。
- ② 流场内一点处静压强的大小与方向无关。

说明：对于理想流体流动，流体质点只受到正压力，没有切向力。对于粘性流体流动，流体质点所受到的作用力既有正压力，也有切向力。单位面积上所受到的切向力称为切应力。对于一元流动，切向力由牛顿内摩擦定律求出；对于多元流动，切向力可由广义牛顿内摩擦定律求得。

(8) 绝对压强、相对压强与真空度。一个标准大气压的压强是 760 mmHg，相当于 101325 Pa，通常用 p_{atm} 表示。若压强大于大气压，则以此压强为计算基准得到的压强称为相对压强，也称为表压强，通常用 p_r 表示。

若压强小于大气压，则压强低于大气压的值就称为真空度，通常用 p_v 表示。

如以压强 0 Pa 为计算的基准，则这个压强就称为绝对压强，通常用 p_s 表示。这三者的关系如下：

$$p_r = p_s - p_{atm}, \quad p_v = p_{atm} - p_s \quad (1-15)$$

说明：在流体力学中，压强都用符号 p 表示，但一般来说有一个约定，对于液体来说，压强用相对压强；对于气体来说，特别马赫数大于 0.1 的流动，应视为可压缩流动，压强用绝对压强。当然，特殊情况应有所说明。

(9) 静压、动压和总压。对于静止状态下的流体而言，只有静压强。对于流动状态的流动，有静压力、动压力和总压强之分。

在一条流线上流体质点的机械能是守恒的，这就是伯努里 (Bernoulli) 方程的物理意义，对于理想流体的不可压缩流动其表达式如下：

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1-16)$$

式中： $p/\rho g$ 称为压强水头，也是压能项， p 为静压强； $v^2/2g$ 称为速度水头，也



Note

是动能项； z 称为位置水头，也是重力势能项；这三项之和就是流体质点的总的机械能； H 称为总的水头高。

若把上式等式两边同时乘以 ρg ，则有：

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-17)$$

式中： p 称为静压强，简称静压； $\frac{1}{2}\rho v^2$ 称为动压强，简称动压；也是动能项； $\rho g H$ 称为总压强，简称总压。

提示：对于不考虑重力的流动，总压就是静压和动压之和。



Note

1.2 流体流动的分类

流体流动按运动形式分：若 $\text{rot}\vec{v} = 0$ ，则流体做无旋运动；若 $\text{rot}\vec{v} \neq 0$ ，则流体做有旋运动。

流体流动按时间变化分：若 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ，则流体做定常运动；若 $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$ ，则流体做不定常运动。

流体流动按空间变化分：流体的运动有一维运动、二维运动和三维运动。

1.3 边界层和物体阻力

1. 边界层

对于工程实际中大量出现的大雷诺数问题，应该分成两个区域：外部势流区域和边界层区域。

对于外部势流区域，可以忽略粘性力，因此可以采用理想流体运动理论解出外部流动，从而知道边界层外部边界上的压力和速度分布，并将其作为边界层流动的外边界条件。

在边界层区域必须考虑粘性力，而且只有考虑了粘性力才能满足粘性流体的粘附条件；边界层虽小，但是物理量在物面上的分布、摩擦阻力及物面附近的流动都是和边界层内的流动联系在一起的，因此非常重要。

描述边界层内的粘性流体运动的是 N-S 方程，但是由于边界层厚度 δ 比特征长度小很多，而且 x 方向速度分量沿法向的变化比切向大得多，所以 N-S 方程可以在边界层内作很大的简化，简化后的方程称为普朗特边界层方程，它是处理边界层流动的基本方程。边界层示意图如图 1-1 所示。



Note

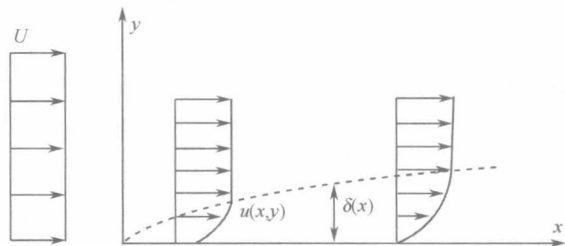


图 1-1 边界层示意图

大雷诺数边界层流动的性质:

边界层的厚度较物体的特征长度小得多, 即 δ/L (边界层相对厚度) 是一个小量。

边界层内粘性力和惯性力同阶。

对于二维平板或楔边界层方程, 可通过量阶分析得到:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$
(1-18)

边界条件: 在物面 $y=0$ 上 $u=v=0$, 在 $y=\delta$ 或 $y \rightarrow \infty$ 时, $u=U(x)$ 。

初始条件: 当 $t=t_0$ 时, 已知 u 、 v 的分布。

对于曲面物体, 则应采用贴体曲面坐标系, 从而建立相应的边界层方程。

2. 物体阻力

阻力是由流体绕物体流动所引起的切向应力和压力差造成的, 故阻力可分为摩擦阻力和压差阻力两种。

摩擦阻力是指作用在物体表面的切向应力在来流方向上的投影的总和, 是粘性直接作用的结果。

压差阻力是指作用在物体表面的压力在来流方向上的投影的总和, 是粘性间接作用的结果, 是由于边界层的分离, 在物体尾部区域产生尾涡而形成的。压差阻力的大小与物体的形状有很大的关系, 故又称为形状阻力。

摩擦阻力与压差阻力之和称为物体阻力。

物体的阻力系数由下式确定:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A}$$
(1-19)

式中: A 为物体在垂直于运动方向或来流方向的截面积。例如, 对于直径为 d 的小圆球的低速运动来说, 其阻力系数为:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}$$
(1-20)

式中: $Re = \frac{V_{\infty} d}{\nu}$, 此式在 $Re < 1$ 时, 计算值与试验值吻合得较好。

1.4 层流和湍流



Note

自然界中的流体流动状态主要有两种形式, 即层流和湍流。在许多中文文献中, 湍流也被译为紊流。层流是指流体在流动过程中两层之间没有相互混掺, 而湍流是指流体不是处于分层流动状态。一般说来, 湍流是普通的, 而层流则属于个别情况。

对于圆管内流动, 当 $Re \leq 2300$ 时, 管流一定为层流; $Re \geq 8000 \sim 12000$ 时, 管流一定为湍流; 当 $2300 < Re < 8000$, 流动处于层流与湍流间的过渡区。

因为湍流现象是高度复杂的, 所以至今还没有一种方法能够全面、准确地对所有流动问题中的湍流现象进行模拟。在涉及湍流的计算中, 都要对湍流模型的模拟能力以及计算所需系统资源进行综合考虑后, 再选择合适的湍流模型进行模拟。Fluent 中采用的湍流模拟方法包括 Spalart-Allmaras 模型、standard k-epsilon 模型、RNG (重整化群) k-epsilon 模型、Realizable k-epsilon 模型、 $\nu_2 - f$ 模型、RSM (Reynolds Stress Model, 雷诺应力模型) 模型和 LES (Large Eddy Simulation, 大涡模拟) 方法。

1.5 流体流动的控制方程

流体流动要受物理守恒定律的支配, 基本的守恒定律包括: 质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。

如果流动包含有不同成分的混合或相互作用, 系统还要遵守组分守恒定律。如果流动处于湍流状态, 系统还要遵守附加湍流输运方程。控制方程是这些守恒定律的数学描述。

1. 质量守恒方程

任何流动问题都必须满足守恒定律。该定律可表述为: 单位时间内流体微元体中质量的增加, 等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一定律, 可以得出质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1-21)$$

该方程是质量守恒方程的一般形式, 适用于可压流动和不可压流动。源项 S_m 是从分散的二级相中加入到连续相的质量(如由于液滴的蒸发), 源项也可以是任何自定义源项。

2. 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为: 微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。

该定律实际上是牛顿第二定律。按照这一定律，可导出动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1-22)$$



Note

式中： p 为静压； τ_{ij} 为应力张量； g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力（如离散相相互作用产生的升力）， F_i 包含了其他的模型相关源项，如多孔介质和自定义源项。

应力张量由下式给出：

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (1-23)$$

3. 能量守恒方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律。该定律可表述为：微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体积力与表面力对微元体所做的功。该定律实际上是热力学第一定律。

流体的能量 E 通常是内能 i 、动能 $K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ 和势能 P 三项之和，内能 i 与温度 T 之间存在一定关系，即 $i = c_p T$ ，其中 c_p 是比热容。可以得到以温度 T 为变量的能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (1-24)$$

式中： c_p 为比热容； T 为温度； k 为流体的传热系数； S_T 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分，有时简称 S_T 为粘性耗散项。

说明：虽然能量方程是流体流动与传热的基本控制方程，但对于不可压缩流动，若热交换量很小至可以忽略时，可不考虑能量守恒方程。此外，它是针对牛顿流体得出的，对于非牛顿流体，应使用另外形式的能量守恒方程。

1.6 边界条件

对于求解流动和传热问题，除了使用上节介绍的三大控制方程以外，还要指定边界条件，对于非定常问题还要制定初始条件。

边界条件就是在流体运动边界上控制方程应该满足的条件，一般会对数值计算产生重要的影响。即使对于同一个流场的求解，随着方法的不同，边界条件和初始条件的处理方法也不同。

在 CFD 模拟计算时,基本的边界类型包括以下几种:

(1) 入口边界条件。入口边界条件就是指定入口处流动变量的值。常见的入口边界条件有速度入口边界条件、压力入口边界条件和质量流量入口边界条件。

速度入口边界条件:用于定义流动速度和流动入口的流动属性相关的标量。这一边界条件适用于不可压缩流,如果用于可压缩流会导致非物理结果,这是因为它允许驻点条件浮动。应注意不要让速度入口靠近固体妨碍物,因为这会导致流动入口驻点属性具有太高的非一致性。

压力入口边界条件:用于定义流动入口的压力以及其他标量属性。它既适用于可压流,也可用于不可压流。压力入口边界条件可用于压力已知但是流动速度和/或速率未知的情况。这一情况可用于很多实际问题,如浮力驱动的流动。压力入口边界条件也可用来定义外部或无约束流的自由边界。

质量流量入口边界条件:用于已知入口质量流量的可压缩流动。在不可压缩流动中不必指定入口的质量流量,因为密度为常数时,速度入口边界条件就确定了质量流量条件。当要求达到的是质量和能量流速而不是流入的总压时,通常就会使用质量入口边界条件。

说明:调节入口总压可能会导致解的收敛速度较慢,当压力入口边界条件和质量入口条件都可以接受时,应选择压力入口边界条件。

(2) 出口边界条件。压力出口边界条件:压力出口边界条件需要在出口边界处指定表压。表压值的指定只用于亚声速流动。如果当地流动变为超声速,就不再使用指定表压,此时压力要从内部流动中求出,包括其他的流动属性。

在求解过程中,如果压力出口边界处的流动是反向的,回流条件也需要指定。如果对于回流问题指定了比较符合实际的值,收敛性困难问题就会不明显。

质量出口边界条件:当流动出口的速度和压力在解决流动问题之前是未知时,可以使用质量出口边界条件来模拟流动。需要注意的是,如果模拟可压缩流或者包含压力出口时,不能使用质量出口边界条件。

(3) 固体壁面边界条件。对于粘性流动问题,可设置壁面为无滑移边界条件,也可指定壁面切向速度分量(壁面平移或者旋转运动时),给出壁面切应力,从而模拟壁面滑移。可以根据当地流动情况,计算壁面切应力和与流体换热情况。壁面热边界条件包括固定热通量、固定温度、对流换热系数、外部辐射换热、对流换热等。

(4) 对称边界条件。对称边界条件应用于计算的物理区域是对称的情况。在对称轴或者对称平面上,没有对流通量,因此垂直于对称轴或者对称平面的速度分量为 0。因此在对称边界上,垂直边界的速度分量为 0,任何量的梯度为 0。

(5) 周期性边界条件。如果流动的几何边界、流动和换热是周期性重复的,则可以采用周期性边界条件。



Note



Note

1.7 流体力学专业词汇

由于大多数 CFD 商用软件都是英文版, 为了方便读者使用和查询, 本节对流体力学中主要专业词汇的中英文对照进行汇总, 如表 1-1 所示。

表 1-1 流体力学专业词汇中英文对照

英文	中文	英文	中文
(non)linear	(非)线性	moment	矩
(non)uniform	(非)均匀	momentum thickness	动量厚度
absolute(gage,vacuum) pressure	绝对(表,真空)压力	momentum(energy)-flux	动量(能量)流量
acceleration	加速度	momentum-integral relation	动量积分关系
area moment of inertia	惯性面积矩	navier-Stokes Equations	N-S 方程
atmospheric pressure	大气压力	net force	合力
average velocity	平均速度	newtonian fluid	牛顿流体
barometer	气压计	newtonian fluids	牛顿流体
bernoulli	伯努力	no slip	无滑移
bernoulli equation	伯努力方程	nondimensionalization	无量纲化
blasius equation	布拉修斯方程	no-slip condition	无滑移条件
body force	体力	nozzle	喷嘴
boundaries	边界	one-dimensional	一维
boundary layer	边界层	operator	算子
breakdown	崩溃	osborne Reynolds	奥斯鲍恩·雷诺
calculus	微积分	parabolic	抛物线
cartesian coordinates	笛卡儿坐标	parallel plates	平行平板
centroid	质心	partial differential equation	偏微分方程
channel	槽道	pathline	迹线
coefficient of viscosity	粘性系数	perfect-gas law	理想气体定律
composite dimensionless variable	组合无量纲变量	plane(curved) surface	平(曲)面
compressible(incompressible)	(不)可压的	plate	板
conservation of mass	质量	poiseuille flow	伯肖叶流动
conservation of mass(momentum, energy)	质量(动量,能量)守恒	prandtl	普朗特
continuum	连续介质	pressure	压力, 压强
control volume	控制体	pressure center	压力中心