

STAR-CCM+与流场计算

主 编 李 明 李明高
副主编 李 高 明 峰 孔繁冰

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



STAR-CCM + 与流场计算

主 编 李 明 李明高
副主编 高 峰 孔繁冰

图书在版编目(CIP)数据

STAR-CCM + 与流场计算 / 李明高主编. —北京: 机械工业出版社, 2011.11
ISBN 958-3-11-32505-1
I. ①李… II. ①李… III. ①流场—计算—教材 IV. ①O32
中国图书馆分类号 O32
机械工业出版社(北京)
策划编辑: 崔景岩



机械工业出版社

地址: 北京市西城区百万庄大街24号
邮编: 100037
电话: (010) 88379646
网址: <http://www.cmpchina.com>

发行部: (010) 88379632 邮购部: (010) 88379633

本书详细介绍了 STAR-CCM + 软件应用于流场分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。

本书共 6 章, 第 1 章主要介绍流体力学基础知识, 第 2 章主要介绍 STAR-CCM + 软件的安装、界面和基本操作, 第 3 章主要介绍采用非定常计算方法进行散热器的流固耦合流场、温度场模拟分析, 第 4 章主要介绍小汽车网格划分、采用分离式计算方法进行外流场计算和阻力分析, 第 5 章主要介绍采用耦合式计算方法进行高速列车空气动力学性能计算、横风性能计算与分析, 第 6 章主要介绍 Fieldview 软件的界面、基本功能和使用案例。

本书可供教学、科研和设计部门从事传热、流体流动等学科的教师、工程技术人员与科研人员参考, 或用于软件自学用教程或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

STAR-CCM + 与流场计算/李明, 李明高主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-111-35792-6

I. ①S… II. ①李…②李… III. ①流场-计算-应用软件, STAR-CCM + IV. ①O35-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 181941 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 连景岩 责任编辑: 连景岩 版式设计: 张世琴

责任校对: 纪敬 封面设计: 路恩中 责任印制: 李妍

高等教育出版社印刷厂印刷

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 17.5 印张 · 427 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35792-6

定价: 49.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版



前言

STAR-CCM+是一款优秀的CFD模拟软件。它将现代软件工程技术、最先进的连续介质力学数值技术(Computational Continuum Mechanics Algorithms)和卓越的设计结合在一起。STAR-CCM+软件的目标是发展成为可以解析任何连续介质力学场的全新代码。

STAR-CCM+软件的一体化集成环境、高重复性和适用性是其被誉为新一代CFD软件的最强闪光点。在STAR-CCM+一体化的工作环境中,可以通过一体化用户界面展示从CAD建模、表面网格准备、体网格生成、模型设定、计算求解一直到后处理分析的整个模拟过程。操作界面与模拟思想的良好整合使得STAR-CCM+非常方便和高效,很好地实现了用户、计算机系统和模拟三者之间的交互操作。

为了将物理情况准确地体现在模拟中,得到良好的计算结果,STAR-CCM+致力于以下三个关键因素:稳健并准确的数值算法;覆盖面宽广的物理模型;易处理的网格体系。

本书全面介绍了STAR-CCM+5.02软件应用于流场分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共6章,第1章主要介绍流体力学基础知识,第2章主要介绍STAR-CCM+5.02软件的安装、界面和基本操作,第3章主要介绍采用非定常计算方法进行散热器的流固耦合流场、温度场模拟分析,第4章主要介绍小汽车网格划分、采用分离式计算方法进行外流场计算和阻力分析,第5章主要介绍采用耦合式计算方法进行高速列车空气动力学性能计算、横风性能计算与分析,第6章主要介绍Fieldview软件的界面、基本功能和使用案例。

本书由李明、李明高任主编,高峰和孔繁冰任副主编。参与编写的还有杨耀华、邵蓉、万翠英、李娜、雷岩鹏、姚峰、彭涤曲、李海强、马雷、唐晨、陈倩倩、邵其方、解雪林等。同时感谢同事韩璐、李国清在本书编写过程中给予的宝贵建议。由于编者水平有限,书中难免有不妥、疏漏之处,欢迎广大读者对本书提出批评和建议,以便做进一步修改和补充。

编者

目 录

前言	57
第1章 计算流体力学基础	1
1.1 流体力学的基本概念	1
1.2 计算流体力学的基本概念	3
1.3 流体运动及换热的基本控制方程	7
1.4 湍流模型	8
1.5 近壁面模型	9
1.6 CFD 求解计算的方法	11
1.7 网格简介	13
1.7.1 结构化网格	13
1.7.2 非结构化网格	14
1.7.3 混合网格	16
第2章 STAR-CCM + 软件介绍	17
2.1 软件概述	17
2.1.1 网格形式	18
2.1.2 STAR-CCM + 常用的四个术语	22
2.2 软件安装流程	23
2.2.1 安装指南	23
2.2.2 启动 License	31
2.3 软件界面介绍	35
2.3.1 菜单	35
2.3.2 工具栏	38
2.3.3 树形菜单	40
2.3.4 视图区	40
2.3.5 属性栏	41
2.3.6 输出窗口	42
2.3.7 鼠标操作	42
2.4 前处理工具介绍	43
2.4.1 包面功能概述	43
2.4.2 重构功能概述	45
2.4.3 面网格检查和修补功能	45
2.4.4 一些网格修复技巧	51
2.5 体网格工具介绍	57
2.5.1 体网格工具	57
2.5.2 边界层设置	57
2.5.3 体网格加密	59
2.5.4 体网格质量标准	59
2.6 求解器	61
2.7 后处理	62
2.8 辅助工具 Tools	67
2.8.1 Annotations	67
2.8.2 Coordinate Systems	67
2.8.3 Field Functions	70
2.8.4 Materials	70
2.8.5 Motions	71
2.8.6 Volume Shapes	71
第3章 散热器的流固耦合换热模拟	73
3.1 建立计算模型	74
3.1.1 新建计算模型	74
3.1.2 选择网格模型	75
3.1.3 网格参数设定	78
3.2 流固物理模型设定	79
3.2.1 流体物理模型设定	79
3.2.2 固体物理模型设定	81
3.2.3 Region 的分割	84
3.2.4 边界条件设定	87
3.2.5 Region 模型设定	90
3.2.6 保存模型	90
3.3 流固耦合换热计算	90
3.3.1 设置计算条件	90
3.3.2 非定常计算设置	96
3.3.3 体网格的生成	101
3.3.4 执行计算	101
3.4 计算结果后处理	103
3.4.1 截面设定	103

3.4.2 模型半透明显示	106	5.2 求解	209
3.4.3 速度矢量图显示	108	5.2.1 计算条件设置	209
3.4.4 流体截面温度云图显示	109	5.2.2 监测曲线和监测点的设定	212
3.4.5 固体温度云图结果显示	114	5.2.3 求解参数设置	220
3.4.6 获取散热器平均温度	116	5.3 后处理	223
3.4.7 窗口文本显示设定	119	5.3.1 计算结果的统计	223
3.4.8 非定常显示输出的设定	121	5.3.2 车体表面压力分布的显示	225
3.4.9 计算结果曲线	127	5.3.3 车体表面区域的流场显示	226
第4章 小汽车外流场计算	129	5.3.4 车体流线的动画显示	229
4.1 模型处理及网格划分	129	5.3.5 计算结果的导出	234
4.1.1 导入车体模型	130	5.4 高速列车横风性能研究	235
4.1.2 包面前的模型处理	131	5.4.1 边界条件设置	236
4.1.3 包面操作	142	5.4.2 计算结果分析	237
4.1.4 Remesh 操作	144	5.4.3 侧风条件下的压力分布和流场 显示	240
4.1.5 生成体网格	147	第6章 Fieldview 软件介绍	244
4.2 求解	163	6.1 Fieldview 菜单栏的介绍	245
4.2.1 边界条件设置	163	6.1.1 File 菜单	245
4.2.2 计算模型	165	6.1.2 Edit 菜单	246
4.2.3 监测曲线的设定	166	6.1.3 View 菜单	246
4.3 后处理	172	6.1.4 Visualization Panels 菜单	247
4.3.1 计算结果的统计	172	6.1.5 Tools 菜单	247
4.3.2 车体表面压力分布的显示	172	6.1.6 Help 菜单	248
4.3.3 汽车中间截面流场的显示	174	6.2 Fieldview 左侧工具栏介绍	248
第5章 列车空气动力学性能计算	179	6.3 其他工具	250
5.1 模型处理及网格	180	6.4 Fieldview 使用案例	252
5.1.1 车体模型的导入和组装	180	6.4.1 散热器热性能计算后处理	252
5.1.2 面网格生成和检查	187	6.4.2 F18 流场显示	261
5.1.3 体网格生成和检查	193		

第 1 章 计算流体力学基础

1.1 流体力学的基本概念

1. 连续介质

1753 年，欧拉提出连续介质模型，即采用“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所组成的稠密而无间隙的连续介质。也可以理解成，流体质点是指几何尺寸同流动空间相比是极小量，又含有大量分子的微元体。气体与液体均属于流体。

流体的密度定义为

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

式中 ρ ——流体密度 (kg/m^3)；

m ——流体质量 (kg)；

V ——流体体积 (m^3)。

对于气体，一般由气体状态方程定义：

$$pV = \rho RT \quad (1-2)$$

式中 p ——气体压强 (Pa)；

V ——气体体积 (m^3)；

ρ ——气体密度 (kg/m^3)；

R ——气体常数，空气的 R 值为 $287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

T ——气体温度 (K)。

2. 流体的导热性

流体的导热性是指当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时，温度较高区域与温度较低区域之间存在热量传递的现象。

热量传递有导热、对流和热辐射三种方式。流体流过壁面时，紧贴壁面的位置会形成层流底层，流体在该处流速很低，几乎可看作为零，故此处流体与壁面进行的是导热过程；层流之外的区域热传递方式主要是对流传热过程。

(1) 导热 单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量。当物体的温度仅在 x 方向发生变化时，按照傅里叶定律（又称导热基本定律），热流密度的表达方式为

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1-3)$$

式中 q ——热流量 (W/m^2)；

Φ ——总换热量 (W)；

A ——换热面积 (m^2)；

λ ——导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]；

$\frac{dT}{dx}$ ——沿 x 方向的温度梯度(K/m), x 为面积的法线方向;

负号“-”表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

(2) 对流 通常情况下, 流体与固体表面间的对流传热量可用下式表达:

$$q = h(T_1 - T_2) \quad (1-4)$$

式中 q ——热流量(W/m²);

h ——换热系数[W/(m²·K)];

$T_1 - T_2$ ——流体与固体的温度差(K)。

(3) 热辐射 一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。实际物体辐射热流量的计算总可以采用斯特藩-波耳兹曼定律的经验修正公式:

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-5)$$

式中 Φ ——总换热量(W);

ε_1 ——物体 1 的发射率(又称黑度), 其值总小于 1;

A_1 ——物体 1 的辐射面积(m²);

σ ——斯特藩-波耳兹曼常量(又称黑体辐射常数), 是个自然常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

T_1, T_2 ——物体 1 和物体 2 的温度(K)。

3. 流体的粘性

流体的粘性是指在做相对运动的两流体层的接触面或流体与固体的接触面上, 存在一对等值且反向的力阻碍流体运动的现象。其产生的原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力。由粘性产生的作用力即粘性阻力, 又称内摩擦力。牛顿内摩擦定律定义的两层流体间切应力的表达式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中 τ ——切应力(N);

μ ——动力粘性系数, 与流体物性和温度有关[kg/(m·s)];

$\frac{du}{dy}$ ——垂直于两层流体接触面上的速度梯度(1/s)。

粘性系数受温度的影响很大, 当温度降低时, 液体的粘性系数增大, 粘性增强; 而气体的粘性系数和粘性则均降低。在压强不是很高的情况下, 粘性系数受压强的影响较小。

4. 可压流体与不可压流体

根据密度 ρ 是否为常数, 可将流体分为可压流体与不可压流体两大类。当密度 ρ 为常数时, 流体为不可压流体。一般水为不可压流体, 空气为可压流体。有些可压流体在特定的流动条件下, 可按不可压流体处理。

不可压流体的压力场是通过连续方程间接描述的, 由于没有直接求解压力的方程, 不可压流体的流动方程的求解尤为困难。

在可压流体的连续方程中含密度 ρ , 因而把密度 ρ 视为连续方程中的独立变量进行求解, 再根据气体的状态方程求出压力。

5. 层流流动与湍流流动

对于管内流动,科学家根据大量实验数据与相似理论得出,流动状态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 Re 来决定的。雷诺数 Re 定义为

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1-7)$$

式中 ρ ——流体密度(kg/m^3);

u ——平均流速(m/s);

d ——管道直径(m);

μ ——动力粘性系数[$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]。

区分层流流动与湍流流动涉及临界雷诺数的概念。其中,由层流转变为湍流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数,用 Re'_{cr} 表示;由湍流转变为层流时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 与两个临界雷诺数,即可确定粘性流体的流动状态。比较准则如下所示:

当 $Re < Re_{cr}$ 时,流动为层流状态。

当 $Re > Re'_{cr}$ 时,流动为湍流状态。

当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时,流动可能为层流状态,也可能为湍流状态。一般称之为过渡状态。

在工程应用中,一般统一取临界雷诺数 $Re_{cr} = 2300$,当 $Re < 2300$ 时,流动为层流流动;而当 $Re > 2300$ 时,可认为流动为湍流流动。

6. 定常流与非定常流

根据流体流动的物理量(如速度、压力、温度等)是否随时间变化,可将流动分为定常流与非定常流两大类。当物理量不随时间变化,即 $\frac{\partial(\quad)}{\partial t} = 0$ 时,流动为定常流动;当流动的物理量随时间变化,即 $\frac{\partial(\quad)}{\partial t} \neq 0$ 时,流动为非定常流动。定常流动也称为恒定流动或稳态流动;

非定常流动也称为非恒定流动、非稳态流动或瞬态流动。

1.2 计算流体力学的基本概念

计算流体力学(CFD)是一种由计算机模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。目前已广泛涵盖了高速铁路行业、汽车和航空业的空气动力学领域(升力、阻力和倾覆力矩等)和内部流场分析、热管理等;电子和电器行业的电子设备换热分析(如冷板、换热器等的流动及传热计算);建筑物的内外环境流场及换热分析(如风载荷、通风等);流体机械的仿真分析(包括泵、风机等);此外,在化学过程分析、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

CFD 的基本思想是:把原来在时间域和空间域上连续的物理量场,用一系列离散点上的变量值的集合来代替,并通过一定的原则和方式建立起反映这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得场变量的近似解。

1. CFD 计算流程

CFD 计算主要包括前处理、求解和后处理三部分。

(1) 前处理 据统计, CFD 计算中, 前处理一般要占一半以上的时间, 主要用于模型修整、面网格生成、体网格生成和计算域、边界条件的设定等。前处理阶段用户需要进行的工作包括:

- ① 定义所求问题的几何计算域。
- ② 将计算域划分为多个互不重叠的子区域, 形成由单元组成的网格。
- ③ 对所研究的物理或化学现象进行抽象, 选择相应的控制方程。
- ④ 定义流体的属性参数。
- ⑤ 为计算域边界处的单元指定边界条件。
- ⑥ 对于瞬态问题, 指定初始条件。

(2) 求解 目前各 CFD 软件采用的求解技术主要有有限差分法、有限元法、谱方法和有限体积法。这些方法均按如下步骤运行: 采用简单函数来近似表示未知的流动变量; 将近似函数代入流动控制方程和所得到的数学式进行离散化; 求解代数方程。其差别主要在于流动变量的近似方法和离散化过程的不同。

目前流动和传热问题中最有效的数值计算方法是有限体积法, 该方法又称为控制体积法, 是一项经过校核且发展很好的通用 CFD 技术, 多数 CFD 软件(如 STAR-CCM+、FLUENT、CFX、PHOENICS)都采用此方法为核心算法。其基本思想为: 将计算区域划分为网格, 并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积; 将待解的偏微分方程对每一个控制体积积分, 从而得出一组离散方程, 其中的未知量是网格点上的特征变量。为求出控制体积的积分, 必须假定特征变量值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法来看, 有限体积法属于加权余量法中的子域法; 从未知解的近似方法来看, 有限体积法属于采用局部近似的离散方法。简而言之, 有限体积法的基本思想就是子域法加上离散。

有限体积法主要包括以下求解步骤:

- ① 在计算域的所有控制容积内对流动控制方程进行积分。
- ② 离散化网格, 将积分方程中的对流项、扩散项和源项用有限差分公式来近似表示, 将积分方程转变为代数方程组。
- ③ 迭代求解该代数方程组。

(3) 后处理 由于计算机技术的不断进步, CFD 软件提供的数据可视化技术和工具越来越多, 如: 计算域和网格显示、等值线图(云图, 包括压力云图、温度云图、速度云图等)、矢量图(如速度矢量图)、视角变换(平移、缩放、旋转)、颗粒追踪、动画输出等。

2. 离散化

离散化是指将求解区域的空间分割为网格, 以网格上的离散的值来近似空间上连续的值。每一个解析网格即一个控制体, 如图 1-1 所示。

计算时, 从边界条件处获得物理量的值, 在相邻网格之间有着质量、动量和能量的传递。随着计算的推进, 得到全部网格上流速、压力和密度等物理量的值, 如图 1-2 所示。

以网格上离散的值构建差分方程的方法称为差分格式, 离散网格上的差分



图 1-1 控制体

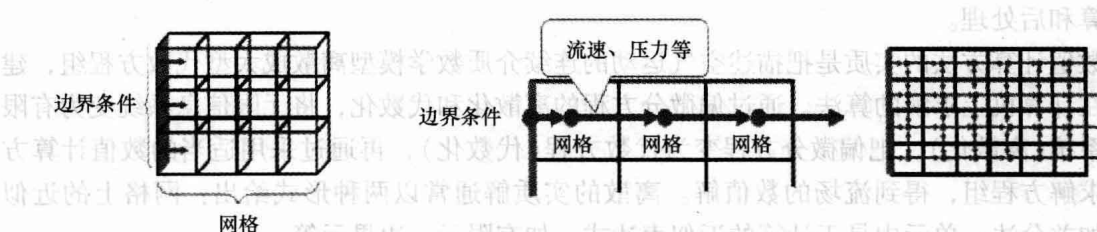


图 1-2 离散化的原理

方程是连续空间上的微分方程的近似。使用不同的差分格式，计算的精度、稳定性都有变化。

理想的离散格式要求既具有稳定性，又具有较高精度，同时还能适应不同的流动形式。但实际上这种离散格式很难实现。表 1-1 列出了几种常用离散格式的性能对比，其中 Pe 数表征某点处的对流和扩散的强度比例。

表 1-1 常用离散格式的性能对比

离 散 格 式	稳定性及条件	精度与经济性
中心差分	条件稳定 $Pe \leq 2$	在不发生振荡的前提下，可获得较准确的计算结果
一阶迎风	绝对稳定	当 Pe 较大时，假扩散严重。为避免此问题，需要加密网格
混合格式	绝对稳定	当 $Pe \leq 2$ 时，性能同中心差分；当 $Pe > 2$ 时，性能同一阶迎风
指数格式	绝对稳定	精度高，主要适用于无源项的对流扩散问题
乘方格式	绝对稳定	性能同指数格式，但比指数格式省时
二阶迎风	绝对稳定	比一阶迎风精度高，仍有假扩散问题
QUICK	条件稳定 $Pe \leq 8/3$	可减少假扩散误差，精度较高，应用广泛
改进的 QUICK	绝对稳定	性能同 QUICK 格式，不存在稳定性问题

在表 1-1 的基础上，可总结出以下规律：

- 1) 在满足稳定性条件的前提下，一般截断误差阶数较高的格式具有较高的计算精度。如具有三阶截断误差的 QUICK 格式，通常可以获得较高的计算精度。在选用低阶截断误差格式时，注意应将网格划分得足够密，以减少假扩散影响。
- 2) 稳定性与精确性常常互相矛盾。精确度较高的格式，如 QUICK 格式等，都不是无条件稳定，而假扩散现象相对严重的一阶迎风格式则是无条件稳定。其中的一个原因是，为提高离散格式的截断误差等级，通常需要从所研究的节点两侧取用一些节点来构造该节点上的导数计算式，而当导数计算式中出现下游节点且其系数为正时，迁移特性遭到破坏，因此格式只能是条件稳定。
- 3) 一阶和二阶差分格式均可应用于二维和三维问题。

3. 流体力学的研究方法

CFD 解析方法采用数值方程式表示实际流体。为使其简化，往往采用位势流理论、边界层近似、完全气体近似等，进而导入相应的湍流数学模型并进行数值计算。由于计算是基于对实际流体的近似进行，故应考虑计算前提近似的影响，根据计算结果的精确度、可信性、计算机条件和计算经验等确定合适的数值解法。然后编写程序代码，利用计算机进行求

解计算和后处理。

数值计算方法的实质是把描述空气运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程组，建立可在计算机上求解的算法。通过偏微分方程的离散化和代数化，将无限信息系统变为有限信息系统(离散化)，把偏微分方程变为代数方程(代数化)，再通过采用适当的数值计算方法，求解方程组，得到流场的数值解。离散的实质解通常以两种形式给出：网格上的近似值，如差分法；单元中易于计算的近似表达式，如有限元、边界元等。

CFD 是建立在全 Navier—Stokes 方程(简称 N-S 方程)近似解基础上的计算技术。根据近似解的精度等级，把 N-S 方程的解法分为以下四类：

- ① 线性非粘性流方法。
- ② 非线性非粘性流方法。
- ③ 平均雷诺数基础上的 N-S 方程解法。
- ④ 全 N-S 方程解法。

CFD 数值计算方法主要包括有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界体积法(BIM)等。其中，有限差分法包括有限体积法(FVM)、流线曲率法(SCM)、质量网格法(PIC)、流体网格法(FLIC)等，这些方法均为有限差分法的一种或其变形的一种方法。三种方法的比较如表 1-2 所示。

表 1-2 三种 CFD 数值计算方法的比较

比 较 项	有限差分法	有 限 元 法	边界体积法
网格分割	规则的格子普遍用于边界的网格分割	可自由地分割为三角形、四边形、三棱柱、六面体等网格	边界的面元分割
建立一次方程式的系数行列	大型、带成分不密集的行列	大型、带成分不密集的行列	小型、成分密集的行列
主要特征	最基本的标准解法	精确度高，对已有程序使用方便，计算量大	输入数据少
适用性	适用性广，用于伴有冲击波的超声速流边界层流，LES 计算	适用于复杂形状的境界	定常流中的流体自由表面流

由于有限体积法应用较为广泛，也有人将 CFD 数值计算方法分为有限差分法、有限元法、有限体积法三类。

流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况如表 1-3 所示。

表 1-3 流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况

假 设	导 出 方 程	CFD 方法	假 设	导 出 方 程	CFD 方法
无粘流	欧拉方程	欧拉法	时均流	雷诺方程	k-Epsilon 模型
无旋流	拉普拉斯方程	涡格法 边界层法 面元法			低雷诺数 k-Epsilon 模型
					各向同性 k-Epsilon 模型
					雷诺应力模型
			空间平均	大涡模型	
			无处理		直接模型

1.3 流体运动及换热的基本控制方程

散热器内的空气流动、小汽车和高速动车组外流场的空气流动特性,其实质均是流体流动与换热问题。流体运动是最复杂的物理行为之一,与结构设计领域中应力分析等问题相比,其建模与数值模拟要困难得多。然而,对任何复杂的湍流流动,N-S 方程都是适用的。流体运动及换热的控制方程为

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1-8)$$

式中 ρ ——流体的密度;

u_i ——流体速度沿 i 方向的分量。

$$\text{动量方程} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1-9)$$

式中 p ——静压力;

τ_{ij} ——应力矢量;

ρg_i —— i 方向的重力分量;

F_i ——由于阻力和能源而引起的其他能源项。

$$\text{能量守恒方程} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (1-10)$$

式中 h ——焓;

k ——分子传导率;

k_t ——由于湍流传递而引起的传导率;

S_h ——定义的体积源。

由以上的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程可知,共有 u 、 v 、 w 、 p 、 T 、 ρ 6 个未知量,为了使方程组封闭,还需要补充一个联系 p 和 ρ 的状态方程(1-2)。

湍流流动是非常复杂的流动,计算湍流运动时,需要附加湍流方程。模型方程的选取要视具体情况而定,在此以 k - ε 双方程模型为例。

标准 k - ε 模型是半经验公式,主要是基于湍流动能和扩散率。湍流动能方程—— k 方程是个精确方程,而湍流耗散率方程 ε 方程是个由经验公式导出的方程。如不考虑用户自定义的源项时,标准 k - ε 模型方程如式(1-11)和式(1-12)所示。

湍流动能 k 方程

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1-11)$$

湍流耗散率 ε 方程

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1-12)$$

式中 μ_l ——层流粘性系数;

μ_t ——湍流粘性系数。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1-13)$$

式中 G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能;

G_b ——由浮力产生的湍流动能;

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_k 和 σ_ε ——经验常数;

C_μ ——湍流常数。

有效的粘性系数

$$\mu = \mu_t + \mu_l \quad (1-14)$$

k - ε 模型假定流场完全是湍流, 分子之间的粘性可以忽略。因而标准 k - ε 模型只对完全湍流的流场有效。

模型常量是从空气、水的基本湍流试验中得来的, 一般取值为

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.99, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

以上方程组是非线性二阶偏微分方程组, 对大多数工程问题, 无法获得精确解析解, 只能用 CFD 数值模拟的方法求解。数值方法的实质是离散化和代数化。数值计算就是将描述物理现象的偏微分方程在一定的网格系统内离散, 用网格节点处的场变量值近似描述微分方程中各项所表示的数学关系, 按一定的数学原理构造与微分方程相关的离散代数方程组, 引入边界条件后求解离散代数方程组, 得到各网格节点处的场变量分布, 用这一离散的场变量分布近似代替原微分方程的解析解。

1.4 湍流模型

层流和湍流是流体运动的两种基本形式。1883 年, 雷诺揭示了粘性流动这两种不同本质的流动形态。自此, 世界各国学者对湍流进行了持续研究, 取得不少进展, 解决了很多工程领域的难题。但由于湍流运动极其复杂, 其基本机理至今未能完全掌握, 而且不能准确地定义并定量地给出湍流的运动特性。目前, 一般将湍流的主要特征归结为随机性、扩散性、有涡性和耗散性。

湍流出现在速度变动的地方, 这种波动引起流体介质之间动量、能量和浓度的变化, 而且引起了数量的波动。由于这种波动是小尺度、高频率的, 所以若在实际工程计算中直接模拟, 对计算机的要求会很高。实际上瞬时控制方程可能在时间上、空间上是均匀的, 或者可以人为地改变尺度, 这样修改后的方程耗费较少的计算量。但是, 修改后的方程可能包含有我们所不知的变量, 湍流模型需要用已知变量来确定这些变量, 目前能够用于工程计算的湍流数值计算方法是雷诺平均方法, 即只计算大尺度平均流动, 所有湍流脉动对平均流动的作用, 用湍流模式理论加以封闭, 使计算量大为减少。在各种湍流模式中, 涡粘性湍流模型在工程计算中应用尤为广泛, 但由于目前的湍流模型基本上都是基于低速不可压缩模式发展的, 工程中一般选用广为应用的标准 k - ε 模型。

湍流流动受壁面影响很大, 很明显平均流动区域将由于壁面不光滑而受到影响。当然, 湍流还受到壁面产生的其他影响。在离壁面很近的地方, 粘性力将抑制流体切线方向速度的变化, 而且流体运动受壁面阻碍从而抑制了正常的波动。

在近壁面的外部区域, 湍流动能受平均流速的影响而增大, 湍流运动加剧。LES 模型仅适用于湍流核心区域(一般都远离壁面), 应该考虑怎样使这些模型适用于壁面边界层处的流动。如果近壁面的网格划分足够好, Spalart-Allmaras 和 k - ω 模型可以解决边界层的流动。

1.5 近壁面模型

前面介绍的 $k-\varepsilon$ 模型是针对充分发展的、高 Re 数的湍流模型。但对于近壁区的流动, Re 数较低, 湍流发展并不充分, 湍流的脉动影响不如分子粘性的影响大。要对近壁区内的流动进行模拟计算, 则必须对前面所述的 $k-\varepsilon$ 方程进行修正。壁面函数法和低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型均可有效解决近壁区及低 Re 数情况下的流动计算问题。

在无滑移壁面附近, 存在很强的变量梯度。此时, 粘性效应对输运过程有很大影响, 在数值模拟过程中就需考虑壁面的粘性效应和边界层内快速变化的变量的求解这两大问题。

实验研究表明, 对于在固体壁面上充分发展的湍流流动, 沿壁面法线方向, 可将流动区域划分为壁面区和核心区。核心区的流动可以认为是完全湍流区。壁面区又可分为粘性底层、过渡层和对数律层。

粘性底层在最里层, 又叫粘性力层, 流动区域很薄, 在这个区域里, 粘性力在动量、热量及质量交换中都起主导作用, 湍流切应力可以忽略, 因此流动几乎是层流流动, 平行于壁面的速度分量沿壁面法线方向呈线性分布。

过渡层处于粘性底层的外面, 其中粘性力与湍流切应力作用相当, 流动状况比较复杂, 很难用一个公式或定律来表述。由于过渡层的厚度极小, 故计算中将其归入对数律层。

对数律层处于最外层, 其中粘性力的影响不明显, 湍流切应力占主导地位, 流动处于充分发展的湍流状态, 流速分布接近对数关系。

为建立壁面函数, 现引入两个无量纲参数 u^+ 和 y^+ , 分别表示速度和距离, 即

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (1-15)$$

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1-16)$$

式中 u ——流体的时均速度;

u_τ ——壁面摩擦速度, $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$;

τ_w ——壁面切应力;

Δy ——到壁面的距离。

大量试验表明, 近壁面区域可以分成三层。如图 1-3 所示, 以 $\ln y^+$ 为横坐标, u^+ 为纵坐标, 将壁面区内划分为三个子层及核心区内的流动。图 1-3 中的小三角形及小空心圆代表在两种 Re 数下实测得到的速度值 u^+ , 直线代表对速度进行拟合后的结果。

根据普朗特的边界层理论, 粘性较小的流体绕流物体时, 粘性的影响仅限于贴近物面的薄层内, 而在这薄层之外可以忽略。在这个薄层内, 形成一个从固体壁面速度为零到外流速度的速度梯度区, 这一薄层即边界层。

合适的边界层网格分布是用好湍流模型的关键因素之一。边界层网格质量的控制可通过控制 y^+ 值范围来实现, 一般对于壁面函数法, 要求 $20 < y^+ < 100$; 对低雷诺数模型, 要求 $y^+ < 2$ 。根据要控制的 y^+ 值范围, 可确定边界层内网格节点和壁面间的最小距离 Δy , 按式 (1-17) 确定。

$$\Delta y = \frac{\sqrt{80Ly^+}}{Re_L^{13/14}} \tag{1-17}$$

式中 L ——特征长度(m);
 Re_L ——特征长度处对应的雷诺数。

假设近壁面的速度分布符合对数函数，可以在边界层内计算得出流体的剪切应力。该函数即壁面函数。通常，近壁面区域流动分析有两种方法：壁面函数法和低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型法。

(1) 壁面函数法 采用壁面函数法的半经验公式可解决壁面对流动的影响，对受粘性力影响的区域(粘性力层及过渡层)，其壁面方程的运用能够很好地修正湍流模型。对于大多数高雷诺数的流动，壁面函数法能充分节省计算资源，因为在近壁面粘性力影响区域，由于变量变化太快，不需要解决，这种方法经济、实用而且很精确，很受欢迎。

壁面函数法的基本思想为：对于湍流核心区的流动采用 $k-\epsilon$ 模型求解，而不求解壁面区，换为直接采用半经验公式将壁面上的物理量与湍流核心区内的求解变量联系起来，这样不经过对壁面区内的流动进行求解，就可以直接得到与壁面相邻控制容积的节点变量值。

在划分网格时，壁面函数法不需要加密壁面区，只需要将第一个内节点布置在对数律成立的区域内，即放置到湍流充分发展区域，如图 1-4a 所示。图中阴影部分为壁面函数公式有效的区域，在阴影以外的网格区域则为采用高 Re 数 $k-\epsilon$ 模型进行求解的区域。壁面函数如同一架桥梁，将壁面值同相邻控制容积的节点变量值联系起来。

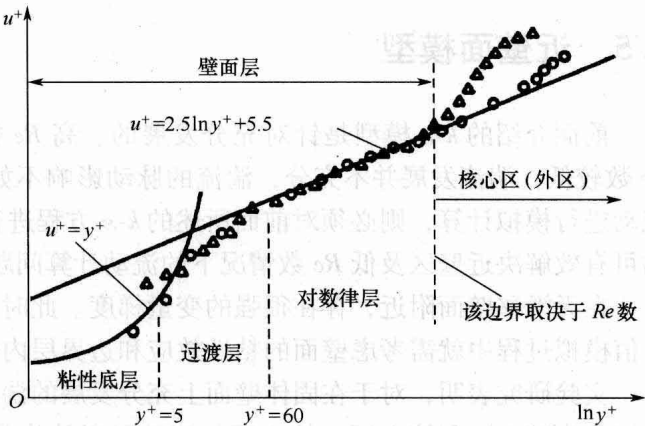


图 1-3 壁面区三个子层的划分与相应的速度

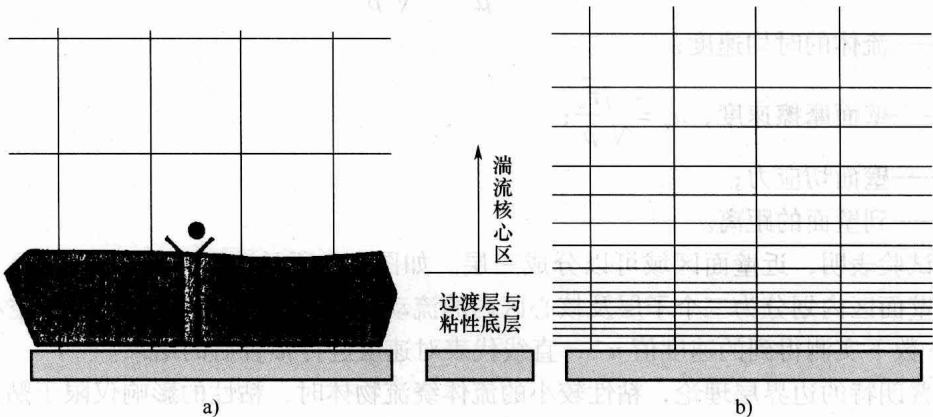


图 1-4 求解壁面区流动两种方法所对应的计算网格

a) 壁面函数法对应的计算网格 b) 低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型对应的计算网格

(2) 低 Re 数 $k-\epsilon$ 模型法 壁面函数法的表达式主要根据简单平板流动边界层的试验资料归纳获得，并未对壁面区内部尤其是粘性底层内的流动进行细致研究，分子的粘性作用没有得到充分考虑。为了能够让基于 $k-\epsilon$ 模型的数值计算能从高 Re 数区域一直延伸到固体壁

面上(该处 Re 数为零), 有学者提出低 Re 数的流动主要体现在粘性底层中, 流体的分子粘性起着绝对重要的作用, 因此必须对高 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型进行以下三方面的修正, 才能使其可用于计算各种 Re 数区域的流动。

① 为体现分子粘性的影响, 控制方程的扩散系数项必须同时包括湍流扩散系数与分子扩散系数两部分。

② 控制方程的有关系数必须考虑不同流态的影响, 即在系数计算公式中引入湍流雷诺数。

③ 在 k 方程中考虑壁面附近湍动能的耗散不是各向同性这一因素。

对于壁面边界, 通常指定壁面处流体的切向速度 u 为零, 即壁面无滑移边界条件; 与壁面垂直的速度 v , 由于在壁面附近 $\frac{\partial u}{\partial x} \approx 0$, 根据连续性方程, $\frac{\partial v}{\partial y} \approx 0$ 。对于无粘性流动, 流体在壁面处无剪切运动, 即壁面为滑移边界条件, 在 STAR-CCM+ 中, 设置滑移边界处, 控制界面上的剪切动量通量和温度梯度为零。

在固体壁面的粘性底层中, 流动与换热的计算可以采用低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型或壁面函数法。采用低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型时, 要在粘性底层中布置较多的节点。采用高雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型, 在粘性底层内不布置任何节点, 把与壁面相邻的第一个节点布置在旺盛湍流区域内。

用壁面函数来表示边界层的速度、温度、湍流能量等物理量的分布。在边界层区域, 流体的湍流效应十分显著, 高雷诺数模型在此区域内就不再适用了, 有时为了减少在壁面附近网格的数量, 又不得不采用高雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型, 故采用壁面函数法来计算壁面处的湍流物理量。

1.6 CFD 求解计算的方法

流场计算求解的本质是对离散方程组的求解。离散方程组的求解方法包括耦合求解法和分离求解法两种, 具体如图 1-5 所示。

1. 耦合求解法

耦合求解法最大的特点为联立求解离散方程组以获得各变量值(u, v, w, p), 具体求解过程如下:

1) 假定初始压力和速度, 确定离散方程的系数和常数项。

2) 联立求解连续方程、动量方程、能量方程。

3) 求解湍流方程及其他方程。

4) 判断当前时间步上的计算是否收敛。如不收敛, 返回至第 2) 步, 进行迭代计算; 如收敛, 重复以上步骤, 计算下一时间步的各物理量值。

耦合求解法可分为隐式求解法(所有变量整场联立求解)、显隐式求解法(部分变量整场联立求解)和显式求解法(在局部地区, 如某个单元, 对所有变量联立求解)。对于显式求解法, 在求解某个单元时, 通常要求相邻单元的物理量值已知。

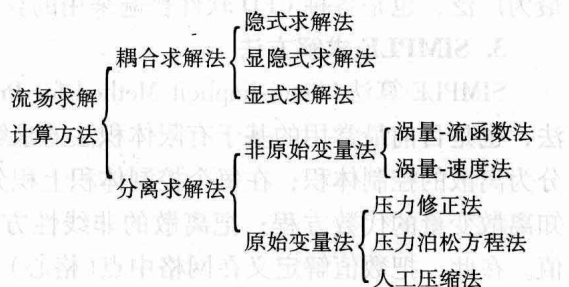


图 1-5 离散方程组的求解方法