



CAD/CAM/CAE工程应用丛书

ANSYS系列

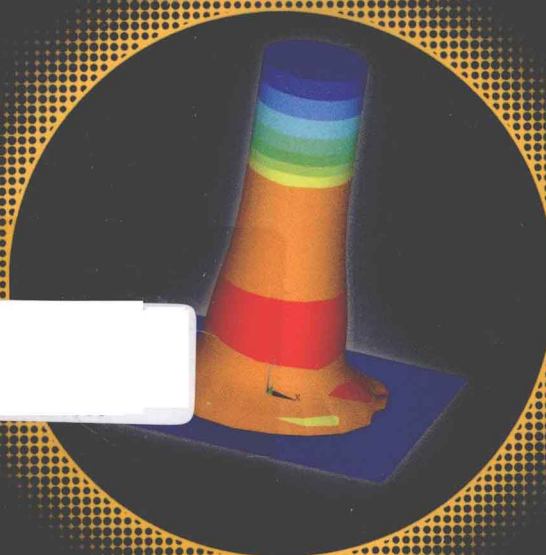
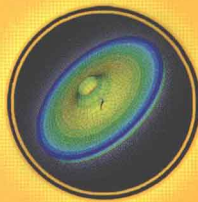
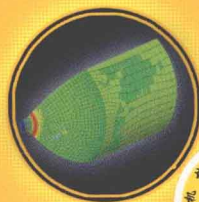
ANSYS FLUENT 14.0

仿真分析与 优化设计

主编 孙帮成 李明高 副主编 李明 李国清 孔繁冰 刘斌

本书核心内容包含

- 计算机流体力学基础
- ANSYS CFD 14.0基础知识
- 排气管道传热系数与辐射计算
- 小汽车空气动力学性能计算
- 室内通风工程问题分析
- 无预混燃烧
- Isight多学科优化设计软件介绍
- 弯管阻力优化
- 高速列车头型气动阻力优化

附赠全书范例
素材 DVD 光盘机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列

ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析 与优化设计

主 编 孙帮成 李明高
副主编 李 明 李国清 孔繁冰 刘 斌



机械工业出版社

本书详细介绍了 ANSYS 14.0 和 ICEM-CFD 软件应用于流体分析领域的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。

本书全面介绍了 ANSYS 14.0 软件流体分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共 9 章,从基本概念及原理开始讲解,逐渐深入到换热分析、流场分析、室内通风问题及优化方法与技术。第 1 章主要介绍了流体力学的基本概念与原理;第 2 章主要介绍了 FLUENT 软件及前处理 ICEM-CFD、后处理 CFD-POST 的基础知识及求解技巧;第 3 章主要介绍了结构网格划分方法、管壁结构换热计算及传热系数的求解方法;第 4 章主要介绍了非结构网格划分方法、运行工况下小汽车的空气动力学性能的设置方法及求解技巧;第 5 章主要介绍了辐射模型种类、太阳加载模型方法及利用 FLUNET 求解工程实践中室内通风问题的分析方法;第 6 章主要介绍了燃烧及化学反应问题;第 7 章主要介绍了 Isight 多学科优化软件的基本功能;第 8 章通过弯管阻力优化实例介绍了 FLUENT 与 Isight 软件、Sculptor 软件联合仿真分析优化方法及单目标优化设计;第 9 章通过高速列车头型气动阻力优化实例介绍了多目标优化设计的方法及技巧。

本书应用 ICEM-CFD 网格划分软件进行了结构化网格和非结构化网格划分方法的讲解,应用 ANSYS FLUENT 14.0 软件对生活、工作中常见的各种流体分析实例进行了计算、分析,重点介绍了 FLUENT 软件与 Isight 多学科优化的联合仿真分析方法及技巧,可为工程研究人员提供优化设计方法指导。

本书可供从事传热、流体流动等学科的教师、工程技术人员与科研人员参考之用,也可用作软件自学教程或参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计/孙帮成,李明高主编. —北京:机械工业出版社,2013.12

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列)

ISBN 978-7-111-44930-0

I. ①A… II. ①孙… ②李… III. ①有限元分析-应用软件 IV. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 283157 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:张淑谦

责任编辑:张淑谦

责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·22 印张·546 千字

0001-4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-44930-0

ISBN 978-7-89405-199-8 (光盘)

定价:62.00 元 (含 1DVD)

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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着信息技术在各领域的迅速渗透, CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用, 从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式, 对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早, 使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计, 而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发, 以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用, 不但可以提高设计质量, 缩短工程周期, 还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性, 掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧, 已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而, 仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的, 只有将计算机技术和工程实际结合起来, 才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑, 机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的《CAD/CAM/CAE 工程应用丛书》。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用, 以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作, 配以大量具有代表性的实例, 并融入了作者丰富的实践经验, 使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点, 是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前 言

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。CFD 的长处是适应性强、应用面广, 目前其广泛应用的领域有: 高速铁路、汽车、航空、船舶等行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、燃烧计算、环境工程、气象分析等方面也有较多应用。

ANSYS 14.0 软件凭借其友好的软件界面、易用的功能模块和高可信度的仿真结果, 帮助客户更快速、便捷和低成本地进行流体力学分析, 为设计人员开发新产品带来了极大的方便。在 ANSYS 14.0 软件的帮助下, 设计者不必费心钻研流体力学微分方程以及计算流体力学, 通过软件丰富的网格划分、计算模型、求解方法等功能, 即可快速完成评估任务、缩短研发周期、提高设计质量。

本书全面介绍了 ANSYS 14.0 软件流体分析的各种功能、基本操作方法和行业应用实例。全书共 9 章, 从基本概念及原理开始讲解, 逐渐深入到换热分析、流场分析、室内通风问题及优化方法与技术。第 1 章主要介绍流体力学的基本概念与原理; 第 2 章主要介绍 FLUENT 软件及前处理 ICEM-CFD、后处理 CFD-POST 的基础知识及求解技巧; 第 3 章主要介绍结构网格划分方法、管壁结构换热计算及传热系数的求解方法; 第 4 章主要介绍非结构网格划分方法、运行工况下小汽车的空气动力学性能的设置方法及求解技巧; 第 5 章主要介绍辐射模型种类、太阳加载模型方法及利用 FLUNET 求解工程实践中室内通风问题的分析方法; 第 6 章主要介绍燃烧及化学反应问题; 第 7 章主要介绍 Isight 多学科优化软件的基本功能; 第 8 章通过弯管阻力优化实例介绍 FLUENT 与 Isight 软件、Sculptor 软件联合仿真分析优化方法及单目标优化设计; 第 9 章通过高速列车头型气动阻力优化实例介绍多目标优化的方法及技巧。

本书应用 ICEM-CFD 网格划分软件进行了结构化网格和非结构化网格划分方法的讲解, 并应用 ANSYS FLUENT 14.0 软件对生活、工作中常见各种流体分析实例进行了计算、分析, 重点介绍了 FLUENT 软件与 Isight 多学科优化的联合仿真分析方法及技巧, 可为工程研究人员提供优化设计方法指导。

本书主要由孙帮成、李明高、李明、李国清、孔繁冰、刘斌编写。此外, 参与编写的还有韩璐、于淼、邵蓉、李欣伟、唐晨、陈倩倩、侯红学等。同时感谢张继业教授、郭迪龙教授、李田副教授和赖宇阳、张伟等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

出版说明

前言

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	4
1.3 流体运动及换热的基本控制方程	8
1.4 湍流的数值模拟方法	9
1.5 标准 $k-\varepsilon$ 模型方程	10
1.6 近壁面处理函数	11
1.7 CFD 求解计算的方法	15
1.8 网格简介	17
1.8.1 结构化网格	17
1.8.2 非结构化网格	18
1.8.3 混合网格	19
1.8.4 网格质量	20
第 2 章 ANSYS CFD 14.0 基础知识	22
2.1 ANSYS FLUENT 14.0 软件概述	22
2.1.1 ANSYS FLUENT 14.0 新功能	22
2.1.2 FLUENT 软件概述	24
2.2 FLUENT 的用户界面	26
2.2.1 启动 FLUENT	26
2.2.2 菜单项	29
2.2.3 项目树	31
2.2.4 鼠标功能	32
2.3 FLUENT 的求解技巧	32
2.3.1 FLUENT 的数值算法	32
2.3.2 FLUENT 的湍流模型	32
2.3.3 FLUENT 的物理模型	34
2.3.4 FLUENT 的边界条件	38
2.3.5 FLUENT 的求解器	46
2.3.6 瞬态 CFD 分析	49
2.3.7 其他应注意的项	51
2.4 CFD-Post 与计算结果后处理	54
2.5 FLUENT 软件在 Workbench 环境中的应用	61



2.6	用户自定义函数 (UDF)	62
2.7	前处理软件介绍	64
2.7.1	ICEM CFD 软件基本功能介绍	64
2.7.2	GAMBIT 软件基本功能介绍	66
第 3 章	排气管道传热系数与辐射计算	69
3.1	传热管模型的创建	70
3.2	网格划分	72
3.3	K 值计算设置与处理	81
3.3.1	导入网格文件	81
3.3.2	设置计算模型	84
3.3.3	设置边界条件	85
3.3.4	求解方法的设置与控制	88
3.3.5	计算	91
3.3.6	计算结果统计	92
3.4	辐射计算设置与处理	92
3.4.1	选择辐射模型	93
3.4.2	边界条件的设定	93
3.4.3	设定材料物性参数	93
3.4.4	求解方法的设置	95
3.4.5	计算结果后处理	96
第 4 章	小汽车空气动力学性能计算	101
4.1	实例介绍	101
4.2	模型处理及网格划分	102
4.2.1	导入模型	102
4.2.2	检查模型	105
4.2.3	建立计算域	106
4.2.4	创建流体域的 Body 项	108
4.2.5	创建 Part 项	109
4.2.6	面网格划分	115
4.2.7	网格质量检查	117
4.2.8	输出网格	119
4.3	模型设置	120
4.3.1	导入网格模型	120
4.3.2	设置计算模型	124
4.3.3	设置边界条件	125
4.4	模型求解	129
4.5	后处理	132
4.5.1	FLUENT 自带后处理	132

4.5.2	CFD-Post 后处理	134
第 5 章	室内通风工程问题分析	141
5.1	FLUENT 软件的太阳辐射模型	141
5.1.1	简介	141
5.1.2	太阳射线跟踪算法	141
5.1.3	DO 辐射算法	142
5.2	实例简介	142
5.3	模型前处理	143
5.3.1	导入模型	143
5.3.2	检查模型及修改	145
5.3.3	设置计算域边界	148
5.3.4	创建流体域的 Body 项	151
5.3.5	网格划分	152
5.3.6	网格质量检查	154
5.3.7	输出网格	156
5.4	计算求解	157
5.4.1	导入模型网格	157
5.4.2	物理条件设置	161
5.4.3	边界条件设置	164
5.4.4	求解条件设置	168
5.4.5	太阳辐射计算	169
5.4.6	表面辐射 (S2S) 计算	172
5.5	计算结果分析	175
5.5.1	室内空气流场分布	177
5.5.2	室内空气温度场分布	179
5.5.3	室内空气流线分布	180
第 6 章	无预混燃烧	183
6.1	无预混燃烧概述	184
6.2	模型设置	184
6.3	模型求解	204
6.4	计算结果后处理	207
第 7 章	Isight 多学科优化设计软件介绍	210
7.1	Isight 软件功能概述	210
7.1.1	概述	210
7.1.2	Isight 软件的主要功能	210
7.1.3	Isight 软件的特点	211
7.1.4	模块构成	212
7.1.5	组件库及组件接口	212



7.2	安装步骤	216
7.3	Isight 软件优化工具	221
7.3.1	试验设计 (DOE)	222
7.3.2	优化方法 (Optimization Method)	225
7.4	优化流程搭建	228
7.4.1	流程建立 (Design Gateway)	228
7.4.2	数据流可视化	228
7.4.3	Loop 循环控制	229
7.4.4	Condition 条件控制	230
7.4.5	Parameter 参数控制	230
7.4.6	数据映射 (Data Mapping) 与数据结构化矩阵 (DSM)	232
7.4.7	方案监控 (Runtime Gateway)	232
7.4.8	数据管理	234
7.4.9	Isight 组件与流程库管理 Isight Library (Design Gateway)	234
7.4.10	任务数据库 Job Database (Runtime Gateway)	236
第 8 章	弯管阻力优化	238
8.1	优化流程概述	238
8.2	弯管阻力优化应用实例	238
8.2.1	变形软件 Sculptor 对弯管的体网格进行变形	238
8.2.2	ICEM 对网格进行处理	244
8.2.3	流体计算软件 FLUENT 对弯管进行计算	248
8.2.4	Isight 软件对各软件进行集成	256
8.2.5	弯管优化后计算结果的后处理	275
第 9 章	高速列车头型气动阻力优化	282
9.1	多目标优化方法介绍	282
9.1.1	多目标优化理论	282
9.1.2	解的占优关系	283
9.1.3	Pareto 最优解集和 Pareto 前沿	284
9.1.4	多目标优化算法	284
9.2	高速列车头型气动阻力优化应用实例	285
9.2.1	变形软件 Sculptor 对高速列车车头的体网格进行变形	285
9.2.2	ICEM 对网格进行转存	292
9.2.3	流体计算软件 FLUENT 对高速列车进行计算	296
9.2.4	Isight 对各个软件进行集成及 DOE 计算	307
9.2.5	试验设计 (DOE) 后处理	324
9.2.6	多学科优化计算	331
9.2.7	多学科优化后处理	339

第1章 计算流体力学基础

本章主要内容:

本章主要介绍计算流体力学的基本概念与原理,为后文各案例中的网格划分、求解设置和后处理等操作提供初步的理论知识。

本章学习目标:

- ◇ 流体力学的基本概念。
- ◇ 计算流体力学的基本概念。
- ◇ 流体运动及换热的基本控制方程。
- ◇ 湍流的数值模拟方法。
- ◇ 标准 $k-\varepsilon$ 模型方程。
- ◇ 近壁面处理函数。
- ◇ CFD 求解计算的方法。
- ◇ 网格简介。

1.1 流体力学的基本概念

流体力学是力学的一个分支,它主要研究流体本身的静止状态、运动状态以及流体和固体界壁间相对运动时的相互作用和流动的规律。与固体力学一样,流体力学的研究也经历了很长的发展历史,其中最具有代表意义的事件包括:18世纪中叶,欧拉采用连续介质的概念,把静流体中压力的概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,正确地用微分方程组描述了无黏流体的运动,因而成为流体力学主要创始人;1845年,斯托克斯推导出黏性流体的一组基本运动方程,即目前广泛采用的纳维-斯托克斯方程,简称 N-S 方程。N-S 方程是流体力学的理论基础,欧拉方程正是 N-S 方程在黏度为零时的特例。

1. 流体的密度和气体状态方程

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,将流体看做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。

流体的密度定义是单位体积内所含物质的多少,若为均匀介质,则有:

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

式中 ρ ——流体密度,单位为 kg/m^3 ;

m ——流体质量,单位为 kg ;

V ——流体体积,单位为 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，单位为 Pa；

V ——气体体积，单位为 m^3 ；

ρ ——气体密度，单位为 kg/m^3 ；

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

T ——气体热力学温度，单位为 K。

2. 流体的黏性

流体的黏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。由黏性产生的作用力即黏性阻力，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：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中 τ ——切应力，单位为 N；

μ ——动力黏性系数，与流体物性和温度有关，单位为 $kg/(m \cdot s)$ ；

$\frac{du}{dy}$ ——垂直于两层流体接触面上的速度梯度，单位为 s^{-1} 。

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

3. 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 3 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，几乎可看做为零，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面积热流量。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），面积热流量的表达式为

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1-4)$$

式中 q ——面积热流量，单位为 W/m^2 ；

Φ ——总热流量，单位为 W；

A ——换热面积，单位为 m^2 ；

λ ——热导率，单位为 $W/(m \cdot K)$ ；

$\frac{dt}{dx}$ ——沿 x 方向的温度梯度，单位为 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面积热量可用下式表达:

$$q = h(T_1 - T_2) \quad (1-5)$$

式中 q ——面积热流量, 单位为 W/m^2 ;

h ——表面传热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

$T_1 - T_2$ ——流体与固体的温度差, 单位为 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忒潘-波尔兹曼定律的经验修正公式:

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-6)$$

式中 Φ ——总换热量, 单位为 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, 单位为 m^2 ;

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

T_1, T_2 ——物体 1 和物体 2 的热力学温度, 单位为 K 。

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。一般水可看做不可压流体, 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, 单位为 kg/m^3 ;

u ——平均流速, 单位为 m/s ;

d ——管道直径, 单位为 m ;

μ ——动力黏性系数, 单位为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

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, 即可确定黏性流体的流动状态。比较准则如下所示:


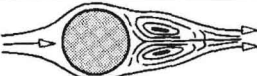




- 当 $Re < Re_{cr}$ 时, 流动为层流状态。
- 当 $Re > Re'_{cr}$ 时, 流动为湍流状态。

● 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。

不同雷诺数绕圆柱的流动效果如表 1-1 所示。

表 1-1 不同雷诺数绕圆柱的流动效果

雷诺数的取值范围	绕圆柱的流动效果	备注
$Re < 5$		蠕动流 (无分离)
$5 \sim 15 < Re < 40$		尾迹区有一对稳定涡
$40 < Re < 150$		层流涡街
$150 < Re < 3 \times 10^5$		分离点前为层流边界层, 尾迹为湍流
$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$		边界层转换为湍流
$Re > 3.5 \times 10^6$		湍流涡街, 但涡间距离更近

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。CFD 的长处是适应性强、应用面广, 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) 以及内部流场分析、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 分析一般应用在产品的概念设计、详细设计和改进设计等阶段。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

在 CFD 计算中，前处理一般要占一半以上的计算时间，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。

目前在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。

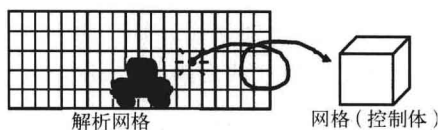


图 1-1 控制体

离散化一般的实施过程是：把所计算的区域划分成许多个互补重叠的子区域，确定每个子区域中的节点位置及该节点所代表的控制体积。区域离散化过程结束后，可以得到以下 4 种几何要素：

- 1) 节点，即需要求解的未知物理量的几何位置。
- 2) 控制容积，即应用控制方程或守恒定律的最小几何单位。
- 3) 界面，它规定了与各节点相对应的控制容积的分界面位置。
- 4) 网格线，即沿坐标轴方向联结相邻两节点而形成的曲线族。

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。

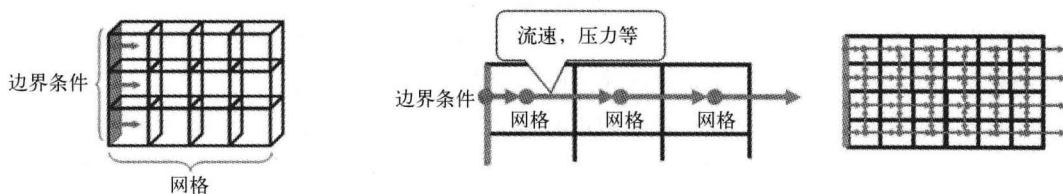


图 1-2 离散化的原理

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 1-2 列出了几种常用离散格式的性能对比。

表 1-2 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，主要用于四边形或六面体网格
改进的 QUICK	绝对稳定	性能同 QUICK 格式，不存在稳定性问题

注：1. Pe 数表征某点处的对流和扩散的强度比例。

2. 假扩散现象是由于对流—扩散方程中一阶导数项的离散格式的截断误差小于二阶而引起较大数值计算误差的现象。

在表 1-2 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. 计算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 4 类:

- 1) 线性非黏性流方法。
- 2) 非线性非黏性流方法。
- 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 1-3 所示。

表 1-3 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 3 类。

流场计算分析中求解 N-S 方程的应用情况如表 1-4 所示。

表 1-4 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
无粘流	欧拉方程	欧拉法
无旋流	拉普拉斯方程	网格法 边界层法 面元法
时均流	雷诺方程	k-Epsilon 模型 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，其实质均是流体运动与换热问题。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如下所示。

连续方程的表达式为：

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

式中， ρ 为流体的密度， u_i 为流体速度沿 i 方向的分量。连续方程又称为质量守恒方程。

动量守恒方程的表达式为：

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

式中， p 是静压力， τ_{ij} 是应力矢量， ρg_i 是 i 方向的重力分量， F_i 是由于阻力和能源而引起的其他能源项。

能量守恒方程表达式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (1-10)$$

式中， h 是焓， k 是分子传导率， k_t 是由于湍流传递而引起的传导率， S_h 是定义的体积源。

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 六个未知量，为了使方程封闭，还需要补充一个联系 p 和 ρ 的状态方程 (1-2)，方程组才能封闭。

流体的宏观性质，如扩散、黏性和热传导等，是分子输运性质的统计平均。由于分子的不规则运动，在各层流体间交换着质量、动量和能量，使不同流体层内的平均物理量均匀化。这种性质称为分子运动的输运性质。结合前述流体力学的基本概念，质量输运在宏观上