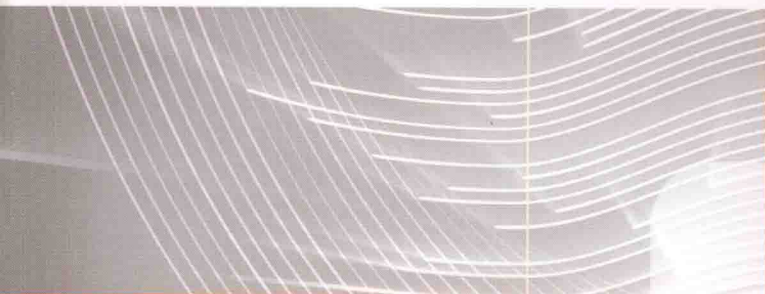


热流体数值计算 方法与应用

何志霞 王谦 袁建平 编著



热流体数值计算 方法与应用

何志霞 王 谦 袁建平 编 著



机械工业出版社

随着计算机技术的迅速发展,数值计算已成为研究热流体工程领域中流体流动、传热传质及化学反应等问题的最为有效的方法之一。本书前半部分系统全面而又浅显易懂地介绍了基于有限体积法的热流体工程中热传导问题、对流与扩散问题及流场等的数值计算和求解原理与方法,并附以详细的 C 语言代码算例帮助理解。后半部分则针对 CFD 技术在动力工程及工程热物理学领域中的应用,以流体机械、动力机械及暖通空调等领域中典型热流体问题为例,介绍了 Pro/E、UG 建模和 ICEM CFD 网格生成等前处理软件,以及当前在热物理各个特定领域广为采用,而又鲜有介绍的 CFX 软件、STAR-CD 软件、STAR-CCM+ 软件、AVL Fire 软件、Converge 软件和 Airpak 软件的基本用法。

本书可作为能源动力、机械工程、环境工程、化学工程、交通工程、土木工程、航空航天等领域的研究生和本科生教材,也可供上述领域的科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热流体数值计算方法与应用/何志霞,王谦,袁建平编著. —北京:机械工业出版社,2013.12

ISBN 978-7-111-44865-5

I. ①热… II. ①何… ②王… ③袁… III. ①数值计算—计算方法—应用—流体—热传导—高等学校—教材 IV. ①O351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 278621 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:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 李 乐 邓海平

版式设计:常天培 责任校对:纪 敬

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16.5 印张·409 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44865-5

定价:35.00 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 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

前言

热流体数值计算的对象为工程设备、自然环境及生物机体中出现的热、质传递，流体流动，化学反应及其他一些有关的热物理过程，因存在于这些过程中的流体基本伴随有热现象，故形象地称之为“热流体”。所采用的方法为计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法。计算流体力学是建立在经典流体力学与数值计算方法基础之上的一门新兴的独立学科，它通过计算机数值计算和图像显示，在时间和空间上定量描述所研究的物理场。

流体流动和传热等热流体现象遍及国民经济和人类生活的各个方面。例如：各种发电设备的工作过程都以流体流动及传热作为基本过程；大楼建筑的采暖与空调同样受到流体流动与传热的控制；化学与冶金工业主要工序中所使用的加热炉、热交换器、冷凝器及反应器等设备也都以热流体为工质；飞机与火箭也正是依靠流体流动、传热及化学反应而飞行；在电机及电子线路的设计中传热往往是一个特别需要考虑的因素；全球的环境污染在很大程度上也是由热与质的传递所致；暴风雨雪、河流泛滥及着火亦是如此；面对气候条件的变化，人体正是凭借着热、质传递来进行自身的温度控制。

热流体现象及过程对人类生活有着非常大的影响，所以，能否有效地控制就显得非常重要。其中对这些过程本质的认识及对这些过程的定量预测成为前提和关键。热物理过程的定量预测即为：对给定物理条件下热物理过程状态的预测，对控制热物理过程的相关变量的预测。当前的研究预测方法有三种：理论分析、试验测试和数值方法，这三种方法构成了研究预测热流体现象及热物理过程的完整体系，其中数值方法是本书的主要内容。

本书共分12章，第1章主要内容为计算流体力学基础；第2章介绍了已有的多种数值计算方法，并对本书重点——有限体积法的思想等作了简要阐述，同时详细给出了离散化代数方程组的求解方法及程序代码；第3、4、5章介绍了有限体积法求解各类问题的基本原理，同时附以C语言代码算例，以帮助读者理解；第6章概括阐述了CFD技术及其在动力工程及工程热物理学领域中的相关应用；第7、8、9、10、11和12章则分别以具体算例为载体介绍了CFD技术在流体机械、汽车设计、暖通空调等领域的应用，以及当前在这些特定领域被广为应用，而又鲜有介绍的各类CFD软件的基本使用方法。本书可作为能源动力、机械工程、环境工程、化学工程、交通工程、土木工程、航空航天等领域的研究生和本科生教材，也可供上述领域的科研人员及工程技术人员参考。

本书在写作过程中，得到了李建治、钟汶君、玄铁民、蒋兆晨、赖晓易、李硕、张州榕、陈冯、王龙滢和张亮等研究生的大力协助，在此表示特别的感谢；本书在编写过程中参考了不少同类书籍，对相关作者表示诚挚的谢意；也有部分材料来源于流体中文网、清洁能源论坛等，对网友所做的工作表示感谢。同时，本书的编写也得到了相关CFD软件技术支持人员、江苏大学能源与动力工程学院很多老师的帮助和支持，在此一并致以深深的谢意！

限于作者知识水平和经验，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 计算流体力学概述 1

1.1.1 计算流体力学的形成和发展 1

1.1.2 计算流体力学方法简介 2

1.1.3 计算流体力学的特点 3

1.1.4 计算流体力学的过程步骤 4

1.2 流体的基本特性 4

1.2.1 流体的密度、重度 and 相对密度 4

1.2.2 流体的粘性 5

1.2.3 流体的压缩性 5

1.2.4 流体的热传导及扩散 6

1.2.5 液体的表面张力 6

1.2.6 流体的运动特性 6

1.3 流体流动的基本控制方程 9

1.3.1 系统与控制体 9

1.3.2 质量守恒方程 9

1.3.3 动量守恒方程 9

1.3.4 能量守恒方程 11

1.3.5 状态方程 11

1.3.6 组分质量守恒方程 12

1.3.7 湍流的雷诺 (Reynolds) 时均方程及湍流模型方程 12

1.3.8 控制方程的通用形式 14

1.4 初始条件及边界条件 15

1.5 控制方程与流动的类型 17

1.6 热流体数值计算的步骤 19

1.7 小结 20

思考题 20

第2章 控制微分方程的数值

求解方法 22

2.1 数值计算方法和分类 22

2.1.1 有限差分法 22

2.1.2 有限体积法 23

2.1.3 有限元法 24

2.1.4 有限分析法 24

2.1.5 边界元法 24

2.1.6 谱分析法 25

2.1.7 数值积分变换法 25

2.1.8 格子-Boltzmann 法 25

2.2 离散化的概念及方法 26

2.2.1 离散化的概念 26

2.2.2 离散化方程的结构 26

2.2.3 离散化方程的推导方法 27

2.3 有限体积法原理 28

2.3.1 有限体积法的基本思想 28

2.3.2 有限体积法的计算网格 28

2.3.3 有限体积法的基本原理 31

2.4 离散化代数方程组的求解 32

2.4.1 概述 32

2.4.2 线性方程组的一般解法——高斯 (Gauss) 消元法 33

2.4.3 三对角方程组的解法——TDMA 算法 34

2.4.4 多维离散化代数方程组的求解方法——迭代法 36

2.5 小结 39

思考题 39

第3章 热传导问题的数值计算 40

3.1 一维稳态热传导问题 40

3.1.1 离散网格的生成 40

3.1.2 控制方程的积分离散 41

3.1.3 界面值的处理 41

3.1.4 源项的处理 43

3.1.5 离散化方程的建立 45

3.1.6 边界条件的处理 46

3.1.7 拟线性离散化方程组的求解 49

3.1.8 有限体积法的4条基本原则 49

3.1.9 一维稳态热传导问题C语言编程实例 51

3.2 一维非稳态热传导问题 55

3.2.1 离散方程的建立 56

3.2.2 显式格式、克兰克-尼科尔森格式及全隐格式 57

3.2.3 全隐格式离散化方程	59	5.3.2 压力修正值方程	95
3.2.4 一维非稳态热传导问题 C 语言 编程实例	59	5.3.3 SIMPLE 算法的求解步骤	96
3.3 二维和三维热传导问题	63	5.3.4 SIMPLE 算法的进一步讨论	97
3.3.1 二维热传导问题的全隐格式离 散化方程	63	5.3.5 压力参考点的选取	98
3.3.2 三维热传导问题的全隐格式离 散化方程	64	5.3.6 简单流场边界条件的处理	98
3.3.3 热传导问题离散化方程的 通用表达式	64	5.3.7 二维稳态层流流场 SIMPLE 算法 求解 C 语言编程实例	100
3.3.4 二维热传导问题 C 语言 编程实例	65	5.4 小结	113
3.4 小结	72	思考题	113
思考题	72	第 6 章 CFD 技术及其应用简介	114
第 4 章 对流与扩散问题的数值计算	74	6.1 CFD 技术的发展概况	114
4.1 一维稳态对流与扩散问题	74	6.2 CFD 技术在工程中的应用	115
4.1.1 控制方程的离散化	74	6.3 CFD 商用软件的结构	117
4.1.2 中心差分格式	76	6.4 常用的 CFD 商用软件	118
4.1.3 一阶迎风格式	77	6.4.1 CFD 软件的发展	118
4.1.4 混合格式	78	6.4.2 CFD 通用软件的主要特点	119
4.1.5 指数格式	79	6.4.3 常用 CFD 商用软件简介	119
4.1.6 乘方格式	80	6.5 CFD 技术在工程热物理领域 中的应用	122
4.1.7 各种离散格式的共同点及 精度比较	81	6.5.1 CFD 技术在流体机械 中的应用	122
4.1.8 低阶离散格式的特点	83	6.5.2 CFD 技术在暖通空调工程 中的应用	128
4.1.9 一维稳态对流与扩散问题 C 语言 编程实例	83	6.5.3 CFD 技术在制冷工程 中的应用	129
4.2 多维对流与扩散问题	86	6.5.4 CFD 技术在汽车设计 中的应用	132
4.2.1 二维瞬态对流-扩散问题的离 散化方程	86	6.6 小结	136
4.2.2 三维瞬态对流-扩散问题的离 散化方程	86	思考题	136
4.2.3 对流-扩散问题离散化方程的 通用表达式	87	第 7 章 基于 CFX 软件的离心泵 内流模拟	137
4.3 小结	88	7.1 CFX 软件介绍	137
思考题	88	7.1.1 软件简介	137
第 5 章 流场的数值计算	90	7.1.2 软件特点	137
5.1 流场数值计算存在的问题	90	7.1.3 软件求解功能	139
5.2 基于交错网格的动量方程离散	91	7.1.4 独具特色的前处理	139
5.2.1 压力梯度项离散的问题	91	7.2 离心泵模型的绘制	140
5.2.2 交错网格下动量方程的离散	92	7.2.1 Pro/E 软件简介	140
5.3 压力修正算法——SIMPLE 算法	94	7.2.2 模型的绘制	142
5.3.1 速度修正方程	94	7.3 离心泵计算区域网格划分	147
		7.4 离心泵内部流动的数值模拟	152
		7.5 计算结果及分析	156

7.6 小结	157	10.3.2 边界分割	196
思考题	157	10.3.3 参数文件准备	197
第8章 基于 STAR-CD 软件的发动机喷嘴内流模拟	158	10.3.4 计算设定	198
8.1 喷嘴内流动区域实体造型	158	10.3.5 后处理	207
8.1.1 UG NX 软件简介	158	10.4 小结	208
8.1.2 喷油器绘制	160	思考题	208
8.2 喷嘴内流的动网格计算	162	第11章 基于 Fire 软件的喷雾燃烧及 SCR 后处理过程模拟	209
8.2.1 STAR-CD 功能简介	162	11.1 Fire 软件介绍	209
8.2.2 STAR-CD 的基本组成部分	163	11.1.1 软件简介	209
8.2.3 动态网格的特征和生成	163	11.1.2 软件特点	209
8.2.4 数值计算	168	11.1.3 软件应用方面的优势	210
8.3 小结	175	11.2 发动机喷雾燃烧过程数值模拟	210
思考题	175	11.2.1 发动机模型	210
第9章 基于 STAR-CCM + 软件的发动机冷却水套流动模拟	176	11.2.2 燃烧室网格划分	212
9.1 STAR-CCM + 软件介绍	176	11.2.3 喷雾燃烧过程数值模拟	218
9.1.1 软件简介	176	11.2.4 数值模拟结果	225
9.1.2 软件特点及优势	176	11.3 SCR 后处理过程数值模拟	227
9.1.3 软件工作界面	176	11.3.1 SCR 催化器三维建模	227
9.2 发动机机体及冷却水套几何模型	178	11.3.2 网格划分	229
9.3 发动机冷却水套流动模拟	179	11.3.3 数值模拟	233
9.3.1 几何模型的导入	179	11.3.4 数值模拟结果	241
9.3.2 网格的生成	179	11.4 小结	241
9.3.3 物理模型和物性参数的设定	183	思考题	241
9.3.4 后处理准备	184	第12章 基于 Airpak 软件的厨房通风系统数值模拟	242
9.3.5 计算结果分析	186	12.1 Airpak 软件介绍	242
9.4 小结	188	12.1.1 软件简介	242
思考题	188	12.1.2 软件特点	242
第10章 基于 Converge 软件的发动机工作过程数值模拟	189	12.1.3 软件工作界面	242
10.1 Converge 软件介绍	189	12.2 厨房空间物理模型	244
10.1.1 软件简介	189	12.3 厨房通风系统数值模拟	246
10.1.2 软件特点及优势	189	12.3.1 厨房求解域网格	246
10.1.3 软件工作界面	193	12.3.2 求解及参数设定	247
10.2 内燃机缸内工作过程物理模型	193	12.3.3 边界条件设置	247
10.2.1 流动相关模型	193	12.3.4 数值模拟操作及设置过程	247
10.2.2 喷雾相关模型	194	12.3.5 数值模拟结果	253
10.2.3 燃烧排放模型	194	12.4 小结	256
10.3 发动机工作过程数值模拟	194	思考题	256
10.3.1 几何导入、诊断及修复	194	参考文献	257

第1章 绪 论

自然界及工程热物理领域中存在着大量的流体流动与传热现象,具体表现形式多种多样。可以把存在或工作在其中的流体形象地称为“热流体”,它们所经历的过程都受到自然界最基本的三个物理定律即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律的支配。随着所研究问题的深入,传统流体力学方法在诸多领域已无法为人们提供比较满意的答案,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)应运而生。热流体数值计算,即采用计算流体力学方法对热流体所经历的过程进行研究,并对过程的状态参数进行预测。

1.1 计算流体力学概述

1.1.1 计算流体力学的形成和发展

计算流体力学是流体力学理论的一个分支,是建立在经典流体力学与数值计算方法基础之上的一门新兴独立学科,于20世纪60年代伴随着高速、大容量电子计算机技术的兴起而迅速崛起。它通过计算机数值计算和图像显示,在时间和空间上定量描述所研究的物理场,从而达到研究物理问题的目的。它兼有理论性和实践性的双重特点,建立了许多理论和方法,为现代科学中许多复杂流动与传热问题的解决提供了有效的计算技术。

经典流体力学主要采用理论分析和试验测试两类方法。它解决某一流动问题的基本过程为:首先,对通用模型方程进行合理简化或依据基本原理建立新的模型方程;然后,提出初始条件和边界条件;最后,用已有数学工具求出模型方程的精确的或近似的解析解。

然而,人们在生产实践中遇到的诸多问题,例如船舶在水中航行时如何减小水的粘性阻力、风载荷对船的结构又有何影响,又如飞机飞行时如何提高其升力、如何控制其飞行高度和方向等都与流动相关,这一类基本流动问题的流动过程往往存在着非常复杂的湍流、分离、气蚀和水击等现象,不是想象的那么容易解决。并且根据各种流动现象建立起来的数学模型(由微分方程表示的定解问题)如由连续性方程、动量方程和能量方程等组成的控制微分方程组(Governing Equations),大多是非线性的偏微分方程组,除了少量特定条件下的问题如一维圆管层流和槽道层流问题,可根据求解问题的特殊性对控制方程及边界条件作相应简化获得解析解外,大多数问题是无法得到解析解,这使理论解析法的工程应用受到很大限制。

因此,长期以来,流体力学的发展主要借助于物理模型试验,但是进行测试不是一项简单的工作。首先,需要专门的测试仪器和试验装置;其次,进行真实条件下的全尺寸试验成本较高,进行模型试验又存在相似和模化的问题;第三,测试本身存在困难,例如测试探头不能随意到达所希望的测试点,且探头本身也会对流场产生扰动,难以保证稳定的试验条件;第四,试验得到的结果一般有其适用范围;另外,试验还会遇到人力和物力的巨大耗费及周期长等许多困难。对于多数工程实际问题,采用对物理模型方程进行简单近似处理所得的解析解也不能满足要求。而电子计算机、现代计算技术和数值计算方法的发展,为解决

这一问题提供了有效途径,数值解法很快发展成为解决工程实际问题的一种重要工具。于是,计算流体力学应运而生,并已发展成为一门独立的学科分支。它是一门以经典流体力学理论为基础,以现代数值方法为手段,通过求解反映基本物理定律的基本数学控制方程来有效地预测流体流动、传热、燃烧、化学反应及相关现象的学科。

1.1.2 计算流体力学方法简介

计算流体力学的核心思想是利用数值计算方法,离散和求解流动问题的控制方程组,获得流场内有限点上流动参数的近似值。即把原来在时间域和空间域上连续的物理量的场如速度场和压力场,用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替,通过一定的原则和方式建立关于这些离散点上的场变量值之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得离散点上场变量的近似值。

CFD 方法是将流场的控制方程组用数值方法离散到一系列网格节点上,并求其离散数值解的一种方法。流体流动的基本规律有质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,由它们可分别导出连续性方程、动量方程和能量方程,这些方程合在一起便是纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)偏微分方程组,简称 N-S 方程组,所有流体流动问题必然遵守该方程组。在以上守恒方程组的基础之上,添加反映流体流动特殊性质的数学模型(如湍流模型、多相流模型和燃烧模型等)和初始条件、边界条件一起便构成封闭的方程组来描述特定流体、流场的流动规律。具体的流场控制方程组分为三类:椭圆型、抛物型和双曲型方程组。从物理意义上概括地说,椭圆型方程组与时间变量无关,仅与空间变量的二次导数项有关,其描述的流动问题一般为定常流动;抛物型与双曲型方程组不仅与空间变量的导数项有关,而且分别与时间变量的一阶和二阶导数项有关,用于描述非定常流动。

CFD 数值求解方法主要有有限差分法、有限体积(容积)法、有限元法、边界元法、有限分析法、谱分析法、数值积分变换法和格子-Boltzmann 法等。虽然后几种方法近几年来有很大的发展,并已成功地解决了一些问题,但就方法的成熟度、实施的难易度及应用的广泛性等而言,有限体积法和有限元法占相当的优势。虽然针对三种不同类型的方程组,数学上已经发展出不同的稳定、收敛的算法,但一般对椭圆型方程组使用有限元法,对抛物型和双曲型方程组则使用有限体积法。目前流行的大型商用 CFD 软件中只有 FIDAP 使用有限元法,而 CFX、PHOENICS、STAR-CD、Fluent 等均采用有限体积法。下面分别简单介绍几种方法的特点。

(1) 有限差分法(Finite Difference Method, FDM) 它是应用最早、最经典的 CFD 方法。它把控制方程中各阶导数用相应的差分表达式(差商)来代替,从而形成离散方程。由于各阶导数差分表达式可由泰勒(Taylor)级数展开而得,所以又称为泰勒级数展开法。该方法发展较早,比较成熟。

(2) 有限元法(Finite Element Method, FEM) 它是 20 世纪 80 年代开始应用的一种数值解法,采用了变分原理。有限元法因求解速度比有限差分法和有限体积法慢,因此应用不是特别广泛。在有限元法的基础上,英国学者 C. A. Brebbia 等提出了边界元法和混合元法等方法。

(3) 有限体积法(Finite Volume Method, FVM) 它把求解域划分为一系列互不重叠的控制体积,将待解微分方程对每一个控制体积分得出离散方程。用有限体积法导出的离散

方程可以保证具有守恒特性,而且离散方程的系数物理意义明确,计算量相对较小。1980年,Patankar在其专著《Numerical Heat Transfer and Fluid Flow》中对有限体积法作了全面的阐述。此后,该方法得到了广泛应用,成为目前CFD方法中应用最广的一种,目前的CFD商用软件也大多采用有限体积法,故本书即以有限体积法为例作重点介绍。

对热流体过程进行分析的计算流体力学CFD方法总体框架如图1-1所示。

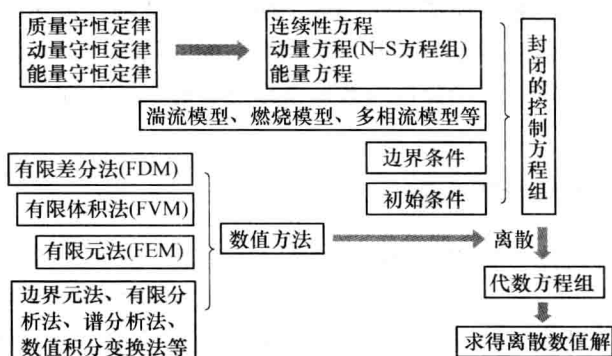


图 1-1 CFD 方法总体框架图

1.1.3 计算流体力学的特点

计算流体力学从经典流体力学的基础之上发展而来,一定程度上弥补了经典流体力学的缺陷,并广泛应用于工程实际。它具有以下优点:

1) 适应性强,应用面广。首先,流动问题的控制方程一般是非线性的,自变量多,求解域的几何形状任意,边界条件复杂,对这些无法求得解析解的问题,用数值解则能很好地满足工程需要;其次,可利用计算机进行各种数值试验,例如可选择不同的流动参数进行试验,可进行物理方程中各项的有效性和敏感性试验,以便进行各种近似处理等。

2) 成本低廉。对于试验和数值模拟都能解决的问题,数值模拟的成本比试验往往要低几个数量级。

3) 速度快。在设定计算条件之后,用数值方法模拟流场所需时间之短是试验无法相比的,且能进行各种工况的模拟,以分析各种因素与流场的关系或确定最优化工况。

4) 资料完备。数值模拟几乎没有达不到的流场位置,可提供全流场的信息,即使是试验研究,也应尽量由数值模拟来预先估计和补充资料。

5) 具有模拟真实条件的能力,避免理论分析和试验测试对实际物理过程的过度简化。

6) 具有模拟理想条件的能力,例如模拟理想流体、绝热表面,模拟计算可准确实现这些假设或边界条件。而在某些情况下,例如进行建筑室内环境控制系统的可行性分析或设计时,只能通过数值模拟来确定最佳方案。

同时,计算流体力学也具有以下缺点:

1) 计算结果依赖于基本方程的可靠性,最终结果不能提供任何形式的解析表达式,只是有限个离散点上的数值解,并有一定的计算误差。

2) 以模型方程为前提,实际应用范围有限,因为很多实际问题目前仍未找到合适的模型,试验探索必不可少。

3) 物理模型试验一开始就能给出流动现象的定性描述, 数值模拟往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数, 并对建立的数学模型进行验证。

4) 由于计算方法和计算手段的限制, 对于已有的数学模型, 并非都能获得成功的数值模拟。

5) 程序的编制及资料的收集、整理与正确利用, 在很大程度上依赖于经验与技巧。

理论分析、试验研究和数值模拟方法构成了研究流体流动及传热等问题的完整体系, 但三类方法各有其适用范围, 三者互为补充可得相得益彰的效果。可以认为, 在当今的科学技术发展水平下, 把试验测定、理论分析与数值模拟三者有机结合起来, 是研究流体流动及传热问题的有效手段。

1.1.4 计算流体力学的过程步骤

一般情况下, 计算流体力学的过程步骤如下:

1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型。具体地说就是要建立反映问题各个量之间关系的微分方程及相应的定解条件, 这是数值模拟的出发点。例如, 质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程, 以及这些方程相应的定解条件。

2) 寻求高效率、高准确度的计算方法, 即建立针对控制方程的数值离散化方法, 如有限差分法、有限元法、有限体积法等, 这些是 CFD 的核心。

3) 编制程序和进行计算, 包括计算网格划分、初始条件和边界条件的输入、控制参数的设定等。这是整个工作中花费时间最多的部分。

4) 显示计算结果。计算结果一般通过图表等方式显示, 这对检查和判断结果、分析质量有重要参考意义。

以上这些步骤构成了 CFD 数值模拟的全过程。其中数学模型的建立是理论研究的课题, 一般由理论工作者完成。

1.2 流体的基本特性

热流体数值计算研究的主要对象是流体, 流体的性质及流动状态不仅决定着 CFD 的计算模型和计算方法的选择, 还决定着流场各物理量的最终分布。

1.2.1 流体的密度、重度和相对密度

1. 流体的密度

我们常说空气比液体轻, 油又比水轻, 其原因就是气体的密度比液体的小, 油的密度又比水的小。流体的密度定义为单位体积内所含物质质量的多少。设流体中包含某点的微元体积 ΔV 所具有的流体质量为 Δm , 则 ΔV 向该点无限缩小时的极限值称为该点处流体的密度, 即

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

流体的密度是流体本身所固有的物理量, 它随温度和压强的变化而变化, 单位为 kg/m^3 。

2. 流体的重度

单位体积流体的重量称为流体的重度。流体的重度与密度有一个简单的关系式, 即

$$\gamma = \rho g \quad (1-2)$$

式中, g 为重力加速度, 通常取值为 9.81 m/s^2 ; 重度的单位为 N/m^3 。

3. 流体的相对密度

流体的相对密度定义为该流体的密度与零下 4°C 时的水的密度之比, 是一个无量纲量。

1.2.2 流体的粘性

粘性 (Viscosity) 是流体内部发生相对运动而引起内部相互作用所表现出来的一种流体宏观属性。

流体是不能承受切应力的, 即使在很小的切应力作用下, 流体也会连续不断地变形。但不同的流体在相同的切应力作用下的变形速度是不同的, 也就是说不同流体抵抗切应力的能力 (表现为流体的内摩擦或流体内部的粘性切应力) 不同, 这种能力称为流体的粘性。

设流体微团在外力作用下出现相对运动时, 任一点 x 方向的速度 u 在 y 方向上的梯度为 du/dy , 则该点的粘性切应力大小为

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

上式称为牛顿粘性公式, 也称牛顿内摩擦定律。比例系数 μ 表征了流体抵抗变形的能力, 即流体粘性的大小, 称为流体的动力粘度, 简称粘度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。工程中还常用动力粘度 μ 和流体密度 ρ 的比值 $\nu = \mu/\rho$ 来表示粘度, 称为流体的运动粘度, 单位为 m^2/s 。粘度是流体的重要固有属性, 它是流体温度和压力的函数。

并不是所有的粘性流体都遵守牛顿内摩擦定律, 据此将流体分为两大类: 遵守牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体 (Newtonian Fluid), 否则称为非牛顿流体 (non-Newtonian Fluid)。如空气、水等均为牛顿流体; 牙膏、泥浆、乳化液等聚合物溶液, 含有悬浮杂质或纤维的流体为非牛顿流体。

实际流体都是有粘性的。当流体的粘性较小 (如空气和水的粘性都很小), 运动的相对速度也不大时, 所产生的粘性切应力与其他类型的力 (如惯性力) 相比可忽略不计, 此时可近似地把流体看成是无粘性的, 这种假想的流体称为无粘流体 (Inviscid Fluid), 也叫做理想流体 (Perfect Fluid)。而对于有粘性的流体, 则称为粘性流体 (Viscous Fluid)。无粘流体只是实际流体在某种条件下的一种近似模型。

1.2.3 流体的压缩性

流体的压缩性是指流体温度或其外部压力发生变化时, 流体密度和体积相应发生变化的特性。

研究流体流动时, 根据其密度是否为常数, 可将流体分为可压缩 (Compressible) 流体和不可压缩 (Incompressible) 流体两大类。当密度为常数时, 流体为不可压缩流体, 否则为可压缩流体。通常空气为可压缩流体, 水视为不可压缩流体。有些可压缩流体在特定的流动条件下, 可按不可压缩流体对待。相应的流动称为可压缩流动和不可压缩流动。

在可压缩流体的连续性方程中含有密度 ρ , 因而可把 ρ 视为连续性方程中的独立变量进

行求解,再根据流体的状态方程求出其压力。不可压缩流体的压力场是通过连续性方程间接规定的,由于没有直接求解压力的方程,不可压缩流体流动方程的求解有其特殊困难。

1.2.4 流体的热传导及扩散

除了粘性、压缩性外,流体还有热传导(Heat Transfer)及扩散(Diffusion)等性质。当流体内部存在温度差时,温度高的地方将向温度低的地方传输热量,这种现象称为热传导。同样,当流体混合物中存在着组分浓度差时,浓度高的地方将向浓度低的地方输送该组分的物质,这种现象称为扩散。

流体的宏观性质,如扩散、粘性和热传导等,是分子输运特性的统计平均。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,使不同流体层内的物理量均匀化,这种性质称为分子运动的输运性质。质量输运在宏观上表现为扩散现象,动量输运表现为粘性现象,能量输运则表现为热传导现象。

理想流体忽略了粘性,即忽略了分子运动的动量输运性质,在理想流体中也不应考虑质量和能量输运性质——扩散和热传导,因为它们具有相同的微观机制。

1.2.5 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。通常,由于环境不同,处于液面的分子与液体内部的分子所受的力是不同的。液体内部的分子所受周围分子的作用力的合力为0,但液体表面的分子却不如此。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,该拉应力称为表面张力(Surface Tension),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,单位为N/m。

由表面张力引起的最为典型的物理现象为毛细现象,即当细玻璃管插入液体时,表面张力向上,能自动将管中的液柱提升一个高度 h ,则有

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g d} \quad (1-4)$$

式中, θ 为液体与玻璃的接触角; d 为玻璃管直径。例如,对于20℃的水,水与玻璃的接触角 $\theta=0$,表面张力 $\sigma=0.073\text{N/m}$,水的密度为 $\rho=1000\text{kg/m}^3$,玻璃管的直径为5mm,则水在玻璃管中的上升高度 h 约为6mm。

当液体与固体壁面接触时,若固体壁面吸附力大于液体内聚力,则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势,称为浸润现象,如水;反之称为不浸润现象,如水银。

1.2.6 流体的运动特性

1. 层流与湍流

层流(Laminar)和湍流(Turbulence)是自然界中两种主要的流体流动状态。许多中文文献中,湍流也称为紊流。层流是指流体在流动过程中两层之间没有相互掺混的流动,而湍流是指流体层间存在掺混且带有旋转的高度不规则的流动。一般来说,湍流比较普遍而层流则属于个别情况。从试验的角度来看,层流流动就是流体层与层之间相互没有任何干扰,层与层之间既没有质量的传递,也没有动量的传递;而湍流流动中层与层之间相互有干扰,而

且干扰的力度还会随着流动的加剧而加大,层与层之间既有质量的传递又有动量的传递。

对于圆管内流动,定义 Reynolds 数(也称雷诺数)为

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (1-5)$$

式中, u 为流体速度; ν 为运动粘度, d 为特征长度,取为管径。

当 $Re \leq 2300$ 时,管路流动一定为层流;当 $Re \geq 8000$ 时,管路流动一定为湍流;而 Re 介于 2300 和 8000 之间的流动处于层流与湍流间的过渡区。

对于非圆管流动,特征长度取为当量直径 d_H , $d_H = 4A/x$, 其中 A 为过流断面面积, x 为湿周(对于液体,湿周等于过流断面上液体与固体接触的周界长度,不包括自由液面以上的气体与固体接触的部分;对于气体,则即为过流断面的周界长度)。层流的临界雷诺数根据实际问题而定,如正方形和正三角形管的临界雷诺数仍近似取为 2300,而偏心环空缝隙则仅为 1000。

2. 边界层流动

粘性流体平滑地绕流某静止物体,在紧靠物体表面的薄层内,流速将由物体表面上的零值迅速地增加到与来流 U_∞ 同数量级的大小。这种在大雷诺数下紧靠物体表面流速从零急剧增加到与来流相同数量级的薄层称为边界层。

边界层示意图如图 1-2 所示,其基本特征如下:

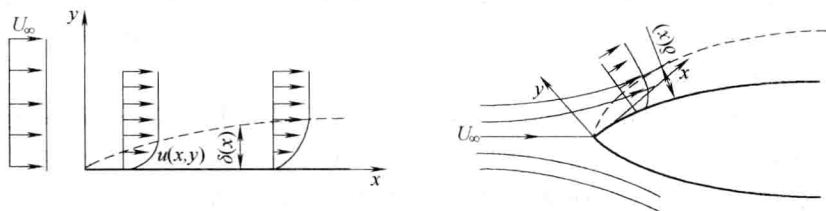


图 1-2 边界层示意图

1) 与物体的长度相比,边界层的厚度很小。

对于流体绕流平板情形,设 $\delta(x)$ 为边界层厚度, l 为平板的板长,则有

$$\frac{\delta}{l} \sim \frac{1}{\sqrt{Re_l}} \quad (1-6)$$

2) 边界层内沿边界层厚度方向的速度变化非常急剧,速度梯度很大。

3) 边界层沿着流体流动的方向逐渐增厚。

4) 由于边界层很薄,可以近似地认为,边界层中各截面上的压力等于同一截面上边界层外边界上的压力。

5) 在边界层内粘性力和惯性力是同一数量级。

6) 边界层内流体的流动有层流和湍流两种流动状态。全部边界层内都是层流的,称为层流边界层。仅在边界层起始部分是层流,而在其他部分是湍流的,称为混合边界层。

判别层流和湍流的准则数同样是雷诺数

$$Re_x = \frac{Vx}{\nu} \quad (1-7)$$

式中, x 为离物体前缘点的距离; V 为边界层外边界上的速度; ν 为流体的运动粘度。对于

平板来说,层流转变为湍流的临界雷诺数为 $5 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$ 。

对于平板层流边界层,边界层厚度 δ 为

$$\delta = 5.84xRe_x^{-\frac{1}{2}} \quad (1-8)$$

切向应力 τ_0 为

$$\tau_0 = 0.343\rho U_\infty^2 Re_x^{-\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

平板壁面上的阻力因数 C_f 为

$$C_f = 1.372Re_l^{-\frac{1}{2}} \quad (1-10)$$

对于平板湍流边界层,边界层厚度 δ 为

$$\delta = 0.37xRe_x^{-\frac{1}{5}} \quad (1-11)$$

切向应力 τ_0 为

$$\tau_0 = 0.0289\rho U_\infty^2 Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (1-12)$$

平板壁面上的阻力因数 C_f 为

$$C_f = 0.074Re_l^{-\frac{1}{5}} \quad (1-13)$$

3. 有旋流动与有势流动

由速度分解定理可知,流体质点的运动可以分解为随同其他质点的平动、自身的旋转运动和自身的变形运动(拉伸变形或剪切变形)。在流动过程中,若流体质点自身作无旋转运动,则称流动是无旋的(无旋流动),也就是有势流动,否则就是有旋流动。

4. 定常流动与非定常流动

根据流体流动过程中的流体属性(如速度、压力、温度等)是否与时间有关,将流动分为定常流动(steady flow)与非定常流动(unsteady flow)两大类。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(transient)流动。通常动力机械启动和关机时的流体流动是非定常流动,而正常运转时可看做定常流动。

5. 流体流动的描述方法

流体流动是由无数质点构成的连续介质的流动,描述流体流动的方法有拉格朗日法和欧拉法两种。

拉格朗日法着眼于观察质点的流动情况,通过研究每个质点的位置、压强和流速等物理量随时间的变化规律,综合流场中的所有流体质点,从而得到整个流场的流体运动规律。若以初始坐标 a, b, c 作为标记区别不同质点,则 t 时刻质点位置坐标可表示为 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(a, b, c, t)$, 可得流速为 $\mathbf{u} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{r}(a, b, c, t)}{\partial t}$, 质点加速度为 $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}(a, b, c, t)}{\partial t^2}$ 。

欧拉法着眼于整个流场中各空间点流动参数随时间的变化,研究流体压力、流速等物理量在空间点上的分布规律,综合流场中的所有点,便可得到整个流场流动参数的变化规律。用欧拉法描述的流场内各点处流速分布可表示为 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$, 加速度的表达式为 $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{u})\mathbf{u}$ 。可见,加速度由两项组成,其中, $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ 为时变加速度(或当地加速度),即表示流动过程中某处的流体质点由于速度随时间变化而引起的加速度; $\text{div}(\mathbf{u})\mathbf{u}$ 称为迁移加速度(或位变加速度),即表示流动过程中流体质点由于速度随位置变化而引起的加速度。

由于研究流体运动常需要从整个流场角度分析流速、压强分布及变化规律,因此,欧拉

法运用得更为广泛,本书随后的内容都是基于欧拉法。

1.3 流体流动的基本控制方程

流体流动所遵循的物理定律是建立流体流动基本控制方程的依据,这些定律主要包括:质量守恒定律、动量守恒定律、动量矩守恒定律、能量守恒定律、热力学第二定律及状态方程和本构方程(应力和应变率或应力张量和应变率张量之间的函数关系)。在实际计算时还必须考虑不同的流态(层流或湍流),流动若是湍流,系统还要遵守附加的湍流输运方程。如果流动包含不同成分(组元)的混合或相互作用,系统还要遵守组分守恒定律。流体流动的基本控制微分方程就是这些守恒定律的数学描述。

1.3.1 系统与控制体

在流体力学中,系统是指某一确定的流体质点集合的总体。系统以外的环境称为外界。分隔系统与外界的分界面,称为系统的边界。系统通常是研究的对象,外界则用来区别于系统。系统将随系统内质点一起运动,系统内的质点始终包含在该系统内,系统边界的形状和所围空间的大小可随运动变化。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)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的、固定不动、形状任意的空间体积。包围这个空间体积的边界面,称为控制面。控制体的形状和大小不变,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,控制体既可通过控制面与外界有质量和能量的交换,也可与控制体外的环境有力的相互作用。

1.3.2 质量守恒方程

质量守恒方程(Mass Conservation Equation),也称为连续性方程(Continuity Equation)。根据流体力学中的连续性假设,流体是由连续分布的流体质点组成的连续介质,它占据整个流动空间。流体的质量既不会凭空产生也不会凭空消失,控制体内部流体质量的增加或减小等于从控制体表面流入或流出的流体质量的总和,其数学表达式就是流体的连续性方程,它是质量守恒定律在流体力学中的表现形式。任何流动问题都必须遵守连续性方程,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1-14)$$

式中, u 、 v 和 w 分别为流体在3个笛卡儿坐标方向上的速度分量。

引入散度符号 $\text{div} \alpha = \partial \alpha_x / \partial x + \partial \alpha_y / \partial y + \partial \alpha_z / \partial z$, 式(1-14)可写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1-15)$$

若流体不可压缩,即流体的密度不随时间和空间变化,保持为常数($\partial \rho / \partial t = 0$),无论流动是否定常,有

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1-16)$$

1.3.3 动量守恒方程

动量守恒方程(Momentum Conservation Equation),也称为动量方程,或N-S方程。动

量守恒定律也是任何流动系统都必须遵守的基本定律,即牛顿第二定律,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力之和

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{w}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (1-17)$$

式中,

$$\begin{cases} \tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div} \mathbf{u}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div} \mathbf{u}, \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div} \mathbf{u}, \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (1-18)$$

其中 λ 称为第二粘度,取值通常为 $-2\mu/3$ 。

将式 (1-18) 代入式 (1-17) 得

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \mathbf{g} \mathbf{r} \mathbf{a} \mathbf{d} \mathbf{u}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \mathbf{g} \mathbf{r} \mathbf{a} \mathbf{d} \mathbf{v}) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{w}) = \text{div}(\mu \mathbf{g} \mathbf{r} \mathbf{a} \mathbf{d} \mathbf{w}) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (1-19)$$

式中, S_u 、 S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项, $S_u = F_x + s_x$, $S_v = F_y + s_y$, $S_w = F_z + s_z$ 。其中 s_x 、 s_y 和 s_z 的表达式如下:

$$\begin{cases} s_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\text{div}(\lambda \mathbf{u})) \\ s_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\text{div}(\lambda \mathbf{u})) \\ s_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\text{div}(\lambda \mathbf{u})) \end{cases} \quad (1-20)$$

一般地, s_x 、 s_y 和 s_z 是小量,对于粘性为常数的不可压缩流体, $s_x = s_y = s_z = 0$ 。

方程 (1-19) 的展开形式为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (1-21)$$

式 (1-19) 及式 (1-21) 即为动量守恒方程。

描述前述的边界层 (图 1-2) 内的粘性流体运动的也是 N-S 方程,但由于边界层厚度 δ