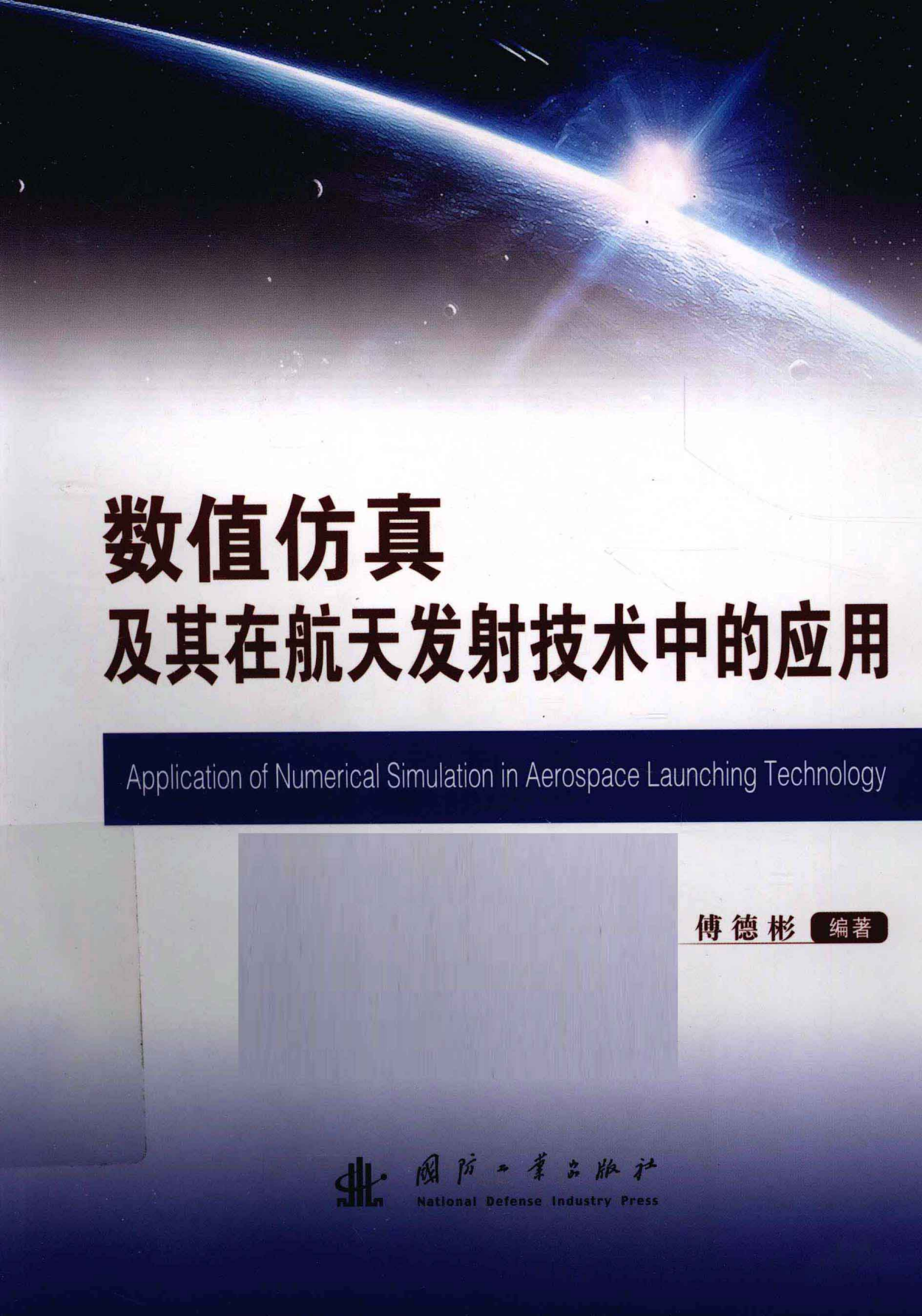




数值仿真 及其在航天发射技术中的应用

Application of Numerical Simulation in Aerospace Launching Technology

傅德彬 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

数值仿真及其在航天 发射技术中的应用

**Application of Numerical Simulation in
Aerospace Launching Technology**

傅德彬 编著

國防工業出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以仿真计算为主线,对流动与传热计算、结构有限元分析、多系统动力学仿真以及这些技术在火箭导弹发射装置设计中的应用进行了全面介绍。书中介绍了这些仿真计算技术相关的理论基础、数值方法和具体应用。全书分为三篇,第一篇为流动与传热分析,第二篇为结构有限元分析,第三篇为多系统动力学分析。

本书可作为相关领域仿真分析人员与火箭导弹地面设备相关的工程技术人员的参考书,也可用作相关专业学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

数值仿真及其在航天发射技术中的应用/傅德彬编
著. —北京:国防工业出版社, 2011. 4
ISBN 978-7-118-07422-2

I. ①数... II. ①傅... III. ①航天器发射—计算机仿真 IV. ①V525

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 056422 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 19¼ 字数 348 千字

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

随着计算机技术的迅速发展,仿真计算为工程设计和科学研究提供了一种全新的技术手段,成为继理论分析和实验分析后的又一种研究分析方法。尤其随着商业软件的推广和应用,仿真计算已经成为科技工作者和工程技术人员广泛使用的通用分析工具。

由于不需要理解深奥的理论和处理繁琐的求解过程,基于商业软件的仿真分析为复杂问题求解计算带来了诸多方便,但其简捷直观的操作有时也带来了其他一些问题。有时分析人员尽管可利用商业软件获得某一问题的计算结果,但由于缺少对相关理论和求解思路的了解,经常不能对所获得的结果做出正确的判断,当然更多时候是难以获得想要的结果。以笔者为例,在接触使用商业软件较长一段时间里,由于缺少对相关理论的深入认识,以至软件使用时长期处于较为盲目的状态。因此,在应用商业软件解决各类复杂问题的同时,了解相关理论基础和求解方法,对更好地解决科学研究和工程设计中的问题具有重要的意义。

针对这一问题,本书结合航天发射技术中经常用到的几类仿真计算方法进行归纳和整理,以使相关领域的读者能够对这些仿真计算的理论基础、数值算法和求解分析注意事项有较为全面的了解。

全书分为三篇,每篇包含3个章节(部分)。第一篇为流动与传热分析,第二篇为结构有限元分析,第三篇为多体系统动力学分析。一般来讲,每篇中的第一部分介绍相关领域对应的基础知识和基本理论,是仿真计算人员必须掌握的内容。每篇第二部分重点介绍仿真计算的基本思路和求解算法,希望深入了解仿真计算原理的读者可关注这部分内容;这一部分还介绍了应用仿真计算软件需要注意的一些事项,可供读者参考。每篇第三部分介绍仿真计算在航天发射技术中的具体应用,并提供了部分示例,可供相关领域的工程技术人员参考。

本书内容是力学基础理论、数值计算方法和专业领域应用的结合,既可供相关领域仿真分析人员使用和参考,也可用作相关专业学生的教材或参考书。本书尝试以仿真计算为主线,对流动与传热计算、结构有限元分析、多体系统动力

学仿真以及这些技术在专业领域的应用进行全面介绍,因此在选材时省略了大量基础理论,并对大量的数学推导进行了删节。读者在阅读时如果需要了解更全面的理论知识或数学公式的详细推导,可参考相关文献。

本书在编写过程中得到了航天部第一研究院 15 所、航天部第二研究院 206 所、航天部第三研究院 8359 所、总装备部设计研究所和北京理工大学兵器发射理论与技术学科组专家和老师们的帮助,在此表示衷心的感谢。此外,书中参阅了大量国内外相关文献,对原作者一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者联系方式:fdba@263.net

作者

2011 年 1 月

目 录

第一篇 流动与传热分析

第 1 章 流动与传热基础	2
1.1 流体力学基本知识.....	2
1.1.1 一些基本概念	2
1.1.2 流体流动的分类.....	5
1.1.3 气体动力学基础.....	7
1.2 传热学基础	12
1.2.1 基本传热方式	12
1.2.2 传热学基本方程	14
1.2.3 传热过程与传热系数	15
1.3 流动控制方程	16
1.3.1 基本控制方程	16
1.3.2 控制方程的不同表示	18
1.3.3 方程类型与定解条件	23
1.3.4 雷诺平均方程	28
1.3.5 湍流模型.....	29
第 2 章 流动与传热数值计算	35
2.1 流动与传热数值计算方法	35
2.1.1 模型方程的离散与计算	35
2.1.2 流动与传热数值计算方法概述	38
2.1.3 基于通用控制方程的离散过程	40
2.1.4 基于矢量形式方程的离散过程	44
2.1.5 求解方法	50
2.2 流动与传热计算中的常见问题	52
2.2.1 计算网格	52
2.2.2 边界类型与参数设置	55
2.2.3 边界上的湍流参数设置	58
2.2.4 收敛条件	60
2.2.5 改善收敛性和计算精度的其他方法	62

2.3	CFD 商业软件	64
2.3.1	CFD 软件通用流程与基本组成	64
2.3.2	常用 CFD 商业软件简介	66
第 3 章	应用与示例	68
3.1	自由射流分析	68
3.1.1	燃气射流流动	68
3.1.2	自由射流模拟	74
3.2	限制射流分析	78
3.2.1	限制射流与冲击流场	78
3.2.2	定常射流冲击分析	83
3.2.3	发射过程非定常射流冲击分析	86
3.3	燃气射流复燃流场分析	90
3.3.1	复燃流场计算模型	91
3.3.2	发动机组分浓度计算方法	93
3.3.3	考虑复燃的自由射流计算	96
3.4	含粒子燃气射流流场分析	100
3.4.1	燃气射流中的粒子特性	100
3.4.2	气固两相燃气射流计算方法	105
3.4.3	含粒子的自由射流流场计算	108
3.5	气液多相流动分析	111
3.5.1	多相流计算模型	111
3.5.2	气液多相流计算示例	115
3.6	发射装置调温、保温分析	117
3.6.1	制冷量与加热量	117
3.6.2	温度场的计算	119

第二篇 结构有限元分析

第 4 章	结构分析的基础知识	124
4.1	基本概念和定律	124
4.1.1	一些基本概念	124
4.1.2	应力的表示	128
4.1.3	应变的表示	132
4.1.4	广义胡克定律	133
4.1.5	强度理论	135
4.1.6	弹性问题的能量表示	138
4.2	线弹性静力分析模型	139
4.2.1	基本模型方程	139

4.2.2	常见简化模型	144
4.2.3	基本定理与原理	146
4.3	模型方程的求解方法	147
4.3.1	直接法	147
4.3.2	试函数法	149
4.3.3	虚功原理与最小势能原理	151
第5章	结构有限元分析	154
5.1	有限元分析原理	154
5.1.1	二杆结构计算示例	154
5.1.2	有限元分析基本思路	158
5.1.3	单元性质与特征处理	161
5.1.4	单元载荷与边界处理	169
5.2	结构有限元分析中的常见问题	171
5.2.1	计算模型的选择	171
5.2.2	几何模型的简化	171
5.2.3	离散方式与单元选择	174
5.2.4	边界条件与连接条件	177
5.2.5	收敛性、误差估计与改善精度的方法	181
5.3	其他类型的结构有限元分析	184
5.3.1	材料非线性问题	184
5.3.2	几何非线性问题	188
5.3.3	接触非线性问题	190
5.3.4	结构稳定性分析	192
5.3.5	结构动力学分析	194
5.4	有限元商业软件	199
5.4.1	软件基本构成与操作	199
5.4.2	常用有限元商业软件简介	200
第6章	应用与实例	202
6.1	发射装置刚度分析	202
6.1.1	发射装置结构分析模型	202
6.1.2	发射装置常见载荷类型	205
6.1.3	发射装置刚度分析示例	209
6.2	基于有限元模型的振动分析	213
6.2.1	发射装置振动模型	213
6.2.2	结构振动特性分析	214
6.2.3	振动特性分析示例	217
6.3	复合材料结构分析	219

6.3.1	复合材料特性	219
6.3.2	复合材料结构有限元分析	224

第三篇 多体系统动力学分析

第7章	动力学基础	227
7.1	基本概念和定理	227
7.1.1	一些基本概念	227
7.1.2	动力学普遍定理	229
7.2	动力学方程	233
7.2.1	相关原理	233
7.2.2	拉格朗日方程	235
第8章	多体系统动力学	238
8.1	多体系统动力学概述	238
8.1.1	多体系统模型要素与拓扑描述	238
8.1.2	多体系统动力学计算方法	239
8.2	多刚体系统动力学	241
8.2.1	刚体的运动描述	241
8.2.2	约束与约束方程	245
8.2.3	运动学与动力学模型	248
8.2.4	动力学方程的数值方法	253
8.3	刚柔耦合动力学模型	256
8.3.1	柔性体的运动描述	257
8.3.2	刚柔耦合动力学方程	259
8.4	多体系统传递矩阵法	261
8.4.1	经典传递矩阵法	261
8.4.2	多刚体系统离散时间传递矩阵法	263
第9章	软件与应用	270
9.1	多体系统动力学商业软件	270
9.1.1	软件组成与基本操作	270
9.1.2	软件应用中的常见问题	272
9.1.3	常用商业软件	279
9.2	弹—架系统多体动力学分析	280
9.2.1	建模的一般思路	280
9.2.2	模型的物理参数	285
9.2.3	动力学响应的激励因素	288
9.2.4	发射过程动力学分析示例	294
参考文献		298

第一篇 流动与传热分析

流动与传热是航天发射技术中必须考虑的重要内容。目前,大多数火箭、导弹依靠将推进剂的化学能转换为动能作为其发射和飞行的动力,伴随推进剂燃烧和燃气流动,喷入环境介质中的高温燃气射流产生的声、光、力、热等环境效应对地面设备产生烧蚀和冲击,对飞行器气动力特性产生影响,对电磁信号产生干扰,此外,其辐射特性也可作为目标辨识的重要特征。因此,燃气流动特性一直是火箭导弹设计中需要考虑的重要内容。与此同时,为提高火箭、导弹的使用寿命和可靠性,带有调温、保温系统的储运发射箱(筒)得到了广泛应用。考虑复杂环境条件下的传热问题,已成为火箭、导弹地面设备研制中的另一个重要领域。

在多数情况下,发射装置设计中涉及的流动与传热结构复杂而多变,给理论分析与实验造成很大的困难。随着计算机技术不断地发展和进步,数值计算方法逐渐在流体力学和传热研究领域崭露头角,成为继理论方法和实验方法之后的又一种重要的研究手段。一些实验困难而理论又无法解决的流动与传热问题,只能依靠数值计算的方法来解决。

本篇以航天发射技术中经常遇到的流动与传热问题为背景,介绍流体流动与传热的基础知识,并对目前常用的数值计算思路进行描述。在此基础上,针对航天发射相关的典型流动与传热问题,进行实例分析和介绍。本篇中部分示例采用商业软件 FLUENT 进行计算,但本书不是商业软件的使用教程,具体的软件操作可参考其使用教程或相关文献。在没有特殊指定情况下,本篇中均采用国际单位制。

第 1 章 流动与传热基础

1.1 流体力学基本知识

流体力学研究的对象是流体。流体所具有的一个最基本的属性就是流动性。流动性是指在任意小的剪切力作用下,流体总是连续不断地变形,直到剪切力消失才停止变形。流动性是流体区别于固体的主要标志。

流体通常又分为液体和气体。液体的分子间有凝聚力,所以有一定的体积,但是没有确定的形状。注入任何容器的液体,都将容器内填满一个与液体自身体积相同的空间,而与容器的形状无关。液体的可压缩性很小,其密度随温度和压强的变化也很小。而气体则是由大量运动着的分子组成,分子之间相互碰撞,不断扩散。气体没有确定的体积和形状,气体会充满它所注入的容器。对于一定量的气体或者气体系统,其压强、温度和体积之间存在一定的关系,即气体状态方程。

流体由大量分子组成,这些分子始终处于不停顿的、无规则的热运动中。从微观上看,流体内部还是有空隙的。为便于研究,1753 年,欧拉确定了一个基本模型,即认为流体(包括气体和液体)是一种连续的介质,分子间无间隙,分子自身的运动被忽略。这就是连续介质假设,而且在大多数情况下,实用效果很好。

在了解流体的流动状态和基本方程之前,首先了解一些基本概念。

1.1.1 一些基本概念

1. 压强

对流场中的某一点,其压强指在任意流体微团的表面 s 上,围绕 A 点取一微面积 Δs ,设垂直于 Δs 作用有外力合力 Δp ,则 A 点的压强定义为下列极限值

$$p = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta s} \quad (1.1.1)$$

在任一给定的瞬间,流体中任一给定点上的压强完全由函数 $p = f(x, y, z, t)$ 所确定,并可由它求解出来。

压强在国际单位制中的单位定义为 Pa。在很多情况下,会采用 1atm ($1\text{atm} =$

1.01325 × 10⁵ Pa)作为参考压强,压强与参考压强的差值称为表压,有时也称为相对压力。

2. 密度

流体密度定义为单位体积内所含物质的多少。在连续介质假设前提下,流体中围绕 A 点取出任一体积 ΔV ,其中的质量为 Δm ,则 A 点的密度定义为下列极限

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1.2)$$

单位质量流体所占有的容积称为比容,它正好与密度的定义相反,二者互为倒数,即

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (1.1.3)$$

3. 温度

温度是表示物体冷热程度的物理量,微观上来讲是物体分子热运动的剧烈程度。温度只能通过物体随温度变化的某些特性来间接测量,而用来量度物体温度数值的标尺叫做温标。它规定了温度的读数起点(零点)和测量温度的基本单位。目前,国际上用得较多的温标有华氏温标(°F)、摄氏温标(°C)、热力学温标(K)和国际实用温标。在气体动力学计算中,所有温度都取成用热力学温标表示的热力学温度。

4. 黏性

流体运动时,流体内部抵抗其剪切变形的特性称为黏性。流体黏性的物理本质是流体分子热运动的结果,一般说来,黏性的大小是随温度而变化的。但液体和气体两者随温度变化的趋势有所不同。液体的黏性来自分子之间的内聚力,当温度增高时,内聚力下降,抵抗剪切变形的能力也随之下降,黏性相应降低;气体的黏性来自相邻流层间分子动量交换,当温度增高时,分子运动加速,有助于动量交换,黏性反而增大。

黏性通常采用黏性系数来表达,即单位速度梯度作用下的剪切应力,可表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1.4)$$

式中: τ 为垂直于 y 轴的流体的剪切应力; μ 为流体的黏性系数(通常称为动力黏性系数); du/dy 为垂直于流体运动方向的速度梯度。

在工程应用中,式(1.1.4)可以作为某种单向流动流体的黏性系数的测定

方法,通过测定 τ 和 $u(y)$ 可以计算出 μ 。如果测得的 $\mu = \tau / \frac{du}{dy} = \text{const}$, 则称这种流体为牛顿流体; 如果 $\mu \neq \text{const}$, 则称该流体为非牛顿流体。

在流体力学中, 由于经常出现 μ/ρ 的比值, 故另用一个符号 ν 来表示, 称为运动黏性系数, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.1.5)$$

当压强不变时, 不同温度下的气体动力黏性系数可根据萨瑟兰公式估算

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \frac{T_0 + C}{T + C} \quad (1.1.6)$$

式中: μ_0 为温度 T_0 时的动力黏性系数; C 为萨瑟兰常数, 取决于气体的种类。

实验证明, 在压强不太高时, 压强对 μ 的影响很小, 当压强变化小于 10^6Pa 时, 可以认为 μ 不受压缩变化的影响。但一般说来, 气体的 μ 随压强的增大而增大。当压强较高时, 可以查询相关文献中的特性曲线。

5. 压缩性

压缩性一般采用体积压缩系数 β 来定义, 即流体被增加一个单位的压强, 其体积的相对变化量可表示为

$$\beta = - \frac{dV}{V dp} = \frac{d\rho}{\rho dp} \quad (1.1.7)$$

气体体积压缩系数的倒数称为气体体积弹性模量, 表征气体弹性, 表示为

$$E = \frac{1}{\beta} \quad (1.1.8)$$

6. 导热性

流体不论是静止还是运动, 只要其中的温度场不均匀, 热量就会由高温处向低温处传递。在温度分布不均匀的连续介质中, 仅仅由于其各部分直接接触而没有宏观的相对运动所发生的热量传递称为热传导, 气体的这种性质称为导热性。

一般来讲, 绝大多数流体的导热性是各向同性的, 其热传导规律遵从傅里叶定律, 即

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (1.1.9)$$

式中: $\dot{q}$ 为热流密度; λ 为导热系数; dT/dn 为法向温度梯度。

导热系数反映了物质的导热能力, 其量值的大小取决于流体的种类、温度和

压强。工程中使用的各种物质的导热系数一般都是通过实验测定的,并制成图表以备查用。

1.1.2 流体流动的分类

流体流动的分类方式有很多,根据流体的物理属性或流动的结构,常用的分类方式有以下几种。

1. 理想流体与黏性流体

如果忽略流体中流体黏性的影响,此时可以近似地把流体看成是无黏性的,成为无黏流体,也叫做理想流体。这时的流动为理想流动,理想流体中没有摩擦,也没有耗散损失。事实上,真正的理想流体是没有的。但是在一定的情形下,至少在特定的流动区域中,某些流体的流动非常接近于理想流动的条件,在分析处理时可以当作理想流体。在理想流动中,所求解的控制方程组为不考虑黏性的欧拉方程组。

如果黏性不能忽略,则是黏性流体,此时所求解的控制方程组为 Navier - Stokes 方程组。

在流体动力学理论中,划分理想流体与黏性流体的基准数不是直接采用流体黏性的大小,而是采用黏性效应的相对大小。这是因为在运动尤其是高速运动的流体中,黏性力对流动参数的影响程度有所不同。当流体的黏性效应相对很小而可以被忽略时,就可当是无黏性的理想流体了。量度黏性效应相对大小的无量纲数是雷诺数,即

$$Re = \frac{\rho \nu L}{\mu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{黏性力}} \quad (1.1.10)$$

式中: Re 为雷诺数; ρ 为流体的密度; ν 和 L 分别为流体的特征速度和特征长度; μ 为流体的黏性系数。

当 Re 很大时,就表示黏性效应很小。在黏性效应很小的流域就可当作理想流体来处理。由此在工程计算中所引发的实际应用情况是,在附体流问题中,气体的黏性效应只显现在物面上的边界层(或称附面层)区域内以及物后的狭窄尾迹区内,在这些区域以外的流场都可认为是无黏性的。只要 Re 很大,边界层足够薄,因而其位移厚度对无黏性外流的附加影响可忽略不计。这样,就可以不考虑边界层厚度的存在,认为物面外都是无黏性流场。这种处理方法的正确性已由大量实验和工程实践所证明。不过有些问题必须考虑边界层的存在,如研究物面受热问题、黏性阻力问题等,这时可将无黏外流与边界层关联起来求解而得到较完整、较精确的流场参数。在数值计算的的实际应用中,如果边界层的影响不可忽略,一般会选用黏性流体来进行求解计算。

2. 可压缩流体与不可压缩流体

根据流体的密度 ρ 是否可视为常数, 流体分为可压缩与不可压缩两大类。当密度 ρ 为常数时, 流体为不可压缩流体, 否则为可压缩流体。

一般来讲, 液体是极难压缩的。如水的体积压缩系数 $\beta \approx 3 \times 10^5 \text{ psi}$ ($1 \text{ psi} = 6.895 \times 10^3 \text{ Pa}$), 所以水的密度的微小改变, 都需要很大的压强。而对于大气中的空气, 在绝热压缩时的 $\beta \approx 20 \text{ psi}$ 。因此, 对于绝大多数问题来说, 可以认为液体是不可压缩的, 只有在研究声波在液体中的传播这类问题时, 人们才需要考虑液体的可压缩性。

另一方面, 气体通常被认为是可压缩流体, 因为气体的密度很容易随着温度和压强而变化。事实上, 在低速气流中, 压强和温度的变化都较小, 不引起密度大的变化, 这时密度仍然可以看作常数, 这种气流也可视为不可压缩流动。但当速度更大时, 就必须考虑气体的压缩性了。再有, 结合式 (1.1.7) 和声速公式 $a^2 = dp/d\rho$ 可得出

$$\beta = \frac{1}{\rho a^2} \quad (1.1.11)$$

由此可见, 一般情况下, 气流压缩性与气流的速度和声速密切相关, 气流速度越大, 压缩系数越大, 反之越小; 声速越大, 气流越不容易压缩, 反之越容易压缩。在这种情况下, 经常采用马赫数来表征气体压缩性, 当马赫数大于 0.3 时, 气流压缩性就必须加以考虑。而在气流马赫数小于 0.3 时, 可将气体当作不可压缩流体。

3. 层流与湍流

自然界中的流体流动状态主要有两种形式, 即层流和湍流。层流是指流体流动是分层或分片的。湍流则与之相反, 在湍流中, 速度分量在其平均值上还叠加有随机的湍流脉动, 如图 1.1.1 所示。嵌入层流中的染料或墨水会显示出一条细线, 而且总是由相同的流体质点组成。但在湍流中, 染色会很快变粗, 并且随着流动会和周围流体混合, 能够观测到许多细丝和浑浊的流团逐渐变粗和弥散。

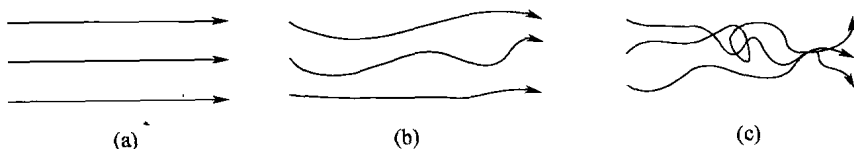


图 1.1.1 层流与湍流示意

(a) 层流; (b) 过渡状态; (c) 湍流。

如何确定流动是层流还是湍流呢?对于特定的流体,可由流动的速度和通道的特征来确定。当流动速度变化时,流动速度往往会经过一个过渡状态,从层流变成湍流。在自然界中,层流和湍流都存在,不过湍流更为普遍。以圆管内的流动为例,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 $2300 < Re < 8000$ 时,流动处于层流与湍流间的过渡区。

一般来讲,湍流机理与流体的黏性耗散以及由此引起的流体扰动和稳定性相关,因此黏性效应一直存在于湍流中,但是被占优势的湍流剪切力所掩盖掉了。在一些数值计算分析中,理想流体的计算结果具有类似湍流的流动状态,这往往是由于数值黏性所带来的影响,而不是实际的湍流流动。

4. 定常流动与非定常流动

定常流动是指在空间的任何点上,流动中的物理量(如速度、压力、温度等)都不随时间改变,即 $\partial(\)/\partial t = 0$;当流动的物理量随时间变化,即 $\partial(\)/\partial t \neq 0$,则为非定常流动。

实际上,如果跟随单个流体质点来观察,则在流动过程中,该质点的物理量是可以变化的,这并不影响对定常流动和非定常流动的定义。在流体力学中,经常关心的是在空间的特定点上发生了什么情况,而不去关心在任何特定的时间上是什么流体质点出现在这里。在这种意义上,定常流中的定常是指在空间的任何点上都没有参数随时间变化。即流体质点可以流走,但是在空间的任一特殊点上,一个流体质点的特性就是所有流体质点到达该点时的特性。

5. 外部流动与内部流动

在很多时候,也可以根据流动的情况和形状分类。基本上存在两种流体形状或流动空间的类型:外部流动和内部流动,通常简称为外流与内流。

内部流动是指管道和渠道中的流动,以及类似的限制在一定结构中的流动,如火箭发动机的燃烧室流动和喷管流动。

外部流动则是流过物体的流动,例如空气动力学中的绕流。

1.1.3 气体动力学基础

流体质点在运动过程中,密度发生较大变化时,需要考虑流体压缩性的影响。气体动力学就是研究压缩性有重要作用的流体运动规律,气体是可压缩气体,是气体动力学的主要研究对象。广义地说,气体动力学是可压缩流体动力学。

气体动力学研究范围很广,这里只简单介绍工程实践中经常用到的一些重要的概念和公式。

1. 气体动力学研究范畴

气体动力学的研究范畴是连续介质气体和完全气体。

前面已经提到,连续介质假设认为流体是一种连续的介质,分子间无间隙,分子自身的运动被忽略。对于气体来讲,连续介质假设的量度标准为

$$K_n < 0.01 \quad (1.1.12)$$

式中: K_n 为克努森数(Knudsen number),而

$$K_n = \frac{l}{L} = 1.255\sqrt{k} \cdot \frac{Ma}{Re} \quad (1.1.13)$$

式中: l 为气体分子运动自由行程,分子运动论给出 $l = 1.255\sqrt{k} \cdot \nu/a$, 此处 k 为气体的比热比, ν 为气体运动黏性系数, a 为声速; L 为特征长度; Ma 为马赫数; Re 为雷诺数。

一般认为,连续介质假设可以应用在大气高度小于 120km 的范围内,再往上就进入稀薄空气动力学的研究范围,在那里,气流被当成自由分子流来处理。

完全气体是对低密度或中等密度真实气体的一个有效近似,它忽略了气体分子的体积以及气体分子间的内聚力,只考虑分子的热运动(平动、转动、振动)的内能。完全气体的热力学参数之间可以方便地用一个总的数学模型来描述,即

$$p = \rho RT = \rho \frac{R_0}{M} T \quad (1.1.14)$$

式中: p 为流体压强; ρ 为流体密度; T 为流体温度; R 为气体常数; R_0 为普适气体常数,也称为通用气体常数, $R_0 = 8314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为摩尔质量。

2. 热力学关系式

前面已经介绍了气体的基本物理量,如压强、密度和温度,其物理概念很明确,而且可以直接测定,故称此三者为气体的基本状态参数。除这三个基本状态参数外,还有一些由它们广延出来的状态参数。这些参数以及它们的相互关系对理解气体动力学知识具有重要作用,这里一一对其进行介绍。

1) 比热容

单位质量气体温度升高 1°C 时所需加进的热量叫做比热容。一般情况下,加热时气体的压强和比容都在变。定压加热所得的比热容叫做定压比热容,即

$$c_p = \left(\frac{dq}{dT} \right)_p \quad (1.1.15)$$

式中: dq 为定压过程中向单位质量气体所加进的微热量; dT 为定压过程中单位