

数值热物理过程

—— 基本原理及CFD软件应用

何志霞 王 谦 袁建平 编著

江苏大学出版社

数值热物理过程

—— 基本原理及CFD软件应用

何志霞 王 谦 袁建平 编著

江苏大学出版社

内容简介

随着计算机技术的迅速发展,数值计算已成为研究工程热物理过程中所存在的流体流动、传热传质及化学反应等问题的最为有效的方法之一。本书系统全面而又浅显易懂地介绍了在工程热物理过程中所出现的热传导问题、对流与扩散问题及流场等的数值计算方法,并以具体实例介绍了数值计算过程中所需用到的 Pro/E 三维造型软件、Gambit 网络生成软件、Fluent 计算软件及 Tecplot 数据后处理软件的使用方法。

本书内容丰富、通俗易懂、可操作性强。在内容编排上充分考虑流体流动与传热数值计算对流体力学、热力学等知识要求的客观特点和初学者的认知规律及心理特点,附有大量的插图和操作实例,每章之后配有习题。

本书可作为热能与动力工程及相关专业本科生教材,同时可供研究生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数值热物理过程:基本原理及 CFD 软件应用/何志霞,
王谦,袁建平编著. —镇江:江苏大学出版社,2009.8
ISBN 978-7-81130-073-4

I. 数… II. ①何…②王…③袁… III. 工程热物理学—
数值计算—应用软件—高等学校—教材 IV. TK121-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151193 号

数值热物理过程:基本原理及 CFD 软件应用

编 著/何志霞 王 谦 袁建平
策 划/杨海濒
责任编辑/徐云峰
出版发行/江苏大学出版社
地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编:212003)
电 话/0511-84446464
排 版/镇江文苑制版印刷有限责任公司
印 刷/丹阳市教育印刷厂
经 销/江苏省新华书店
开 本/787 mm×1 092 mm 1/16
印 张/11.75
字 数/280 千字
版 次/2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷
书 号/ISBN 978-7-81130-073-4
定 价/26.00 元

本书如有印装错误请与本社发行部联系调换

热物理过程是指在工程设备、自然环境及生物机体中出现的热、质传递,流体流动,化学反应以及其他一些有关过程。

在大量的实际问题中,热物理过程都起着重要的作用。例如:各种发电设备的工作过程都以流体流动及传热作为其基本过程;商业大楼和民用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艺过程中所使用的加热炉、热交换器、冷凝器以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、传热以及化学反应而飞行;在电机及电子线路的设计中传热往往是一个需要特别考虑的因素;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、河流泛滥以及着火也是如此;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。可见,传热和流体流动的热物理过程遍及了人类生活的各个方面。

热物理过程对人类社会有如此巨大的影响,所以,有效地控制这种过程就显得非常重要。能否有效地控制取决于对过程本质的认识以及定量地研究预测这些过程所采用的方法。于是,通过对过程本质的认识及采取合适的研究方法,就可以从大量可能的方案中确定最佳的设计方案,以确保所研究设备能达到期望的最佳性能。这种对设备性能的研究预测有助于更安全、更有效地操作现有的设备。

所以,热物理过程研究的关键是对给定物理条件下热物理过程状态的预测,即对控制热物理过程的相关变量值的预测。如对一个一定条件的燃烧室,完整的预测应包括燃烧室内的速度、压力、温度以及各有关化学组分的浓度分布,同时还应当提供燃烧室壁面上的摩擦切应力、热流密度以及质量流量等。预测应能说明其中每一个物理量究竟是如何随几何条件、流量以及流体物性等的变化而改变的。

热物理过程的研究预测当前有 3 种方法:理论分析、试验测试和数值方法。这 3 种方法构成了研究预测热物理过程的完整体系。其中,热物理过程数值方法即采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)方法对热物理过程进行研究,对热物理过程状态参数进行预测,这也是本书的主要内容。

本书的体系是在介绍热物理过程数值模拟基础(第 1 章)及其在工程热物理领域中的应用(第 2 章)和数值模拟基本原理(第 3 章、第 4 章、第 5 章和第 6 章)的基础上,针对数值热物理过程中所要用到的前处理软件 Pro/E 和 Gambit(第 7 章和第 8 章)、求解计算软件 Fluent(第 9 章)及后处理软件 Tecplot(第 10 章)进行了系统的介绍。本书作为热能与

动力工程及相关专业本科生教材,可使学生初步掌握 CFD 热物理过程分析的实用软件,为他们毕业后从事该领域的科研并进一步开展工程设计、产品开发奠定强有力的基础,也为他们解决实际问题提供计算方法和软件工具。本书在作为本科生教材的同时,也可供研究生及工程技术人员参考。

本书在编写过程中参考了不少同类书籍,在此对相关作者表示诚挚的感谢;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,本书的编写也得到江苏大学能源与动力工程学院很多老师和研究生的帮助和支持,得到江苏大学出版社的大力支持,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

2009 年 8 月

1 热物理过程数值计算基础

1.1 计算流体力学概论	(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	(3)
1.2 热物理过程研究对象——流体的基本特性	(4)
1.2.1 流体的密度、重度和比重	(4)
1.2.2 流体的粘性	(4)
1.2.3 流体的压缩性	(5)
1.2.4 流体的热传导及扩散	(5)
1.2.5 液体的表面张力	(5)
1.2.6 流体的运动特性	(6)
1.3 热物理过程控制微分方程	(6)
1.3.1 系统与控制体	(7)
1.3.2 质量守恒方程	(7)
1.3.3 动量守恒方程	(7)
1.3.4 能量守恒方程	(8)
1.3.5 状态方程	(9)
1.3.6 组分质量守恒方程	(9)
1.3.7 湍流的 Reynolds 时均方程及湍流模型方程	(10)
1.3.8 控制方程的通用形式	(12)
1.4 数值热物理过程的步骤	(13)
1.5 总结	(15)

2 CFD 技术及其在工程热物理领域中的应用

2.1 CFD 技术的发展概况	(16)
-----------------------	------

2.2	CFD 技术在工程中的应用	(17)
2.3	CFD 商用软件的结构	(19)
2.4	常用的 CFD 商用软件	(20)
2.4.1	CFD 软件的发展	(20)
2.4.2	CFD 通用软件的主要特点	(21)
2.4.3	常用 CFD 商用软件简介	(21)
2.4.4	掌握 CFD 商用软件的意义	(23)
2.5	CFD 技术在若干工程热物理领域中的应用	(24)
2.5.1	CFD 技术在流体机械中的应用	(24)
2.5.2	CFD 技术在暖通空调工程中的应用	(28)
2.5.3	CFD 技术在制冷工程中的应用	(32)
2.5.4	CFD 技术在汽车设计中的应用	(34)
2.6	总结	(38)

3 控制微分方程求解的数值方法

3.1	数值计算方法和分类	(40)
3.1.1	有限差分法	(40)
3.1.2	有限体积法	(41)
3.1.3	有限元法	(41)
3.1.4	有限分析法	(42)
3.1.5	边界元法	(42)
3.1.6	谱分析法	(42)
3.1.7	数值积分变换法	(43)
3.1.8	格子-Boltzmann 法	(43)
3.2	离散化的概念	(44)
3.3	基于有限体积法的控制方程离散	(44)
3.3.1	有限体积法的基本思想	(44)
3.3.2	有限体积法的计算网格	(45)
3.3.3	有限体积法的介绍	(46)
3.3.4	有限体积法的 4 条基本原则	(48)
3.4	总结	(50)

4 热传导问题的数值计算

4.1	一维稳态热传导问题	(52)
4.1.1	离散化方程的建立	(52)

4.1.2	界面导热系数的处理	(53)
4.1.3	源项的处理	(54)
4.1.4	边界条件的处理	(55)
4.1.5	离散化方程的非线性处理	(56)
4.1.6	线性代数方程组的求解	(56)
4.2	一维非稳态热传导问题	(58)
4.2.1	离散化方程的建立	(58)
4.2.2	显式模式, 克兰克-尼科尔森模式及全隐模式	(59)
4.2.3	全隐式离散化方程	(60)
4.3	二维与三维热传导问题	(60)
4.3.1	二维热传导问题的离散化方程	(60)
4.3.2	三维热传导问题的离散化方程	(61)
4.3.3	多维离散化方程的求解	(62)
4.4	超松弛和欠松弛	(64)
4.4.1	概念的引入	(64)
4.4.2	超松弛和欠松弛引入方法	(64)
4.5	总结	(65)
5	对流与扩散问题的数值计算	
5.1	一维稳态对流与扩散问题	(67)
5.1.1	控制方程的离散化	(67)
5.1.2	中心差分格式	(68)
5.1.3	一阶迎风格式	(69)
5.1.4	混合格式	(71)
5.1.5	指数格式	(71)
5.1.6	乘方格式	(73)
5.1.7	各种离散格式的比较	(73)
5.1.8	低阶离散格式的特点	(74)
5.2	多维对流与扩散问题	(75)
5.2.1	二维瞬态对流-扩散问题的离散化方程	(75)
5.2.2	三维瞬态对流-扩散问题的离散化方程	(75)
5.2.3	离散化方程的通用表达式	(76)
5.3	总结	(76)
6	流场的数值计算	
6.1	流场数值计算存在的问题	(78)

6.2	基于交错网格的动量方程的离散	(79)
6.3	压力修正算法——SIMPLE 算法	(80)
6.3.1	速度修正方程	(81)
6.3.2	压力修正方程	(81)
6.3.3	SIMPLE 算法描述	(82)
6.3.4	SIMPLE 算法的进一步讨论	(83)
6.3.5	压力参考点的选取	(84)
6.4	总结	(84)
7	三维建模 Pro/E 软件基本介绍	
7.1	Pro/E 软件的特点及应用	(86)
7.1.1	Pro/E 的特点	(86)
7.1.2	AutoCAD 与 Pro/E 软件的比较	(87)
7.1.3	Pro/E 在企业 CAD/CAM 中的应用	(88)
7.2	Pro/E 的用户界面	(90)
7.2.1	初始工作界面	(90)
7.2.2	文件的基本操作	(92)
7.2.3	鼠标的基本操作	(94)
7.3	2D 绘图与技巧	(94)
7.3.1	草绘模块简介	(94)
7.3.2	基本几何图形的绘制	(97)
7.3.3	像素尺寸的修改、强化、锁定与删除	(97)
7.3.4	手动标注尺寸	(99)
7.3.5	定义约束条件	(101)
7.3.6	几何编辑工具系列	(102)
7.4	3D 绘图与技巧	(102)
7.4.1	草绘实体特征	(103)
7.4.2	放置实体特征	(104)
7.4.3	特征的操作	(106)
7.5	建立工程图	(107)
7.6	装配件的建立	(109)
7.7	总结	(110)
8	网格生成软件 Gambit 的使用	
8.1	网格生成概述	(114)

8.1.1	网格类型	(114)
8.1.2	网格单元分类	(114)
8.1.3	网格生成步骤	(115)
8.2	Gambit 功能及界面	(115)
8.2.1	Gambit 的特点及功能	(115)
8.2.2	Gambit 的基本界面	(116)
8.2.3	Gambit 的文件组成	(118)
8.2.4	Gambit 中鼠标的操作	(118)
8.2.5	Gambit 的操作步骤	(119)
8.3	Gambit 的应用实例	(119)
8.3.1	单孔轴对称喷嘴内部空穴流动问题描述	(119)
8.3.2	生成几何模型	(120)
8.3.3	划分网格	(121)
8.3.4	指定边界类型和区域类型	(124)
8.3.5	网格的输出	(124)
8.4	AutoCAD 与 Gambit 的联合使用	(125)
8.4.1	柴油机喷油嘴内部流动模拟问题概述	(125)
8.4.2	联合 AutoCAD 和 Gambit 进行三维实体的生成	(126)
8.4.3	划分网格	(127)
8.4.4	指定边界类型和区域类型	(128)
8.4.5	导出网格文件	(128)
8.5	Pro/E 与 Gambit 的联合使用	(129)
8.5.1	离心泵叶轮内部流场计算网格的生成	(129)
8.5.2	离心泵叶轮与蜗壳耦合后流场计算网格的生成	(130)
8.6	总结	(131)

9 Fluent 软件使用入门

9.1	Fluent 概述	(134)
9.1.1	Fluent 数值计算的相关软件包	(134)
9.1.2	Fluent 的文件类型	(135)
9.1.3	Fluent 的特点	(135)
9.1.4	Fluent 使用单位的说明	(137)
9.2	Fluent 的基本操作	(137)
9.2.1	Fluent 的图形用户操作界面	(137)
9.2.2	Fluent 的文本用户操作界面	(138)

- 9.2.3 Fluent 的数值模拟求解步骤 (139)
- 9.3 Fluent 的应用实例 (154)
 - 9.3.1 喷嘴内部空穴两相流动模拟 (155)
 - 9.3.2 计算结果 (157)
- 9.4 总结 (159)
- 10 通用后处理 Tecplot 软件的使用
 - 10.1 Tecplot 的基本功能 (161)
 - 10.1.1 Tecplot 功能概述 (162)
 - 10.1.2 菜单栏介绍..... (164)
 - 10.1.3 工具栏介绍..... (166)
 - 10.1.4 其他工具选项介绍..... (166)
 - 10.2 Fluent 数据在 Tecplot 中的调入 (168)
 - 10.2.1 Tecplot 可调入的数据格式 (168)
 - 10.2.2 Tecplot 读取 Fluent 文件步骤 (168)
 - 10.3 Tecplot 使用实例 (170)
 - 10.3.1 问题描述..... (170)
 - 10.3.2 Tecplot 中的数据后处理 (171)
 - 10.4 总结..... (175)
- 参考文献..... (177)

1 热物理过程数值计算基础

热物理过程数值计算即采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对热物理过程进行研究,对热物理过程状态参数进行预测的过程。

1.1 计算流体力学概论

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,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的方法,在时间和空间上定量描述物理场的数值解,从而达到研究物理问题的目的。

对经典流体力学的研究主要采用理论解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具体模型方程;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。

但是,在人类实际的生产实践活动中,如船舶在水中航行时,如何减小水的粘性阻力,风载荷对船的结构有何影响;又如飞机航行时如何提高飞机的升力,如何控制飞行高度、方向等的一类基本流动问题不是想像得那样容易解决。在实际的流动过程中往往存在较为复杂的湍流、分离、气蚀、水击等流动现象。根据各种流动现象所建立的数学模型(由微分方程表示的定解问题),如由连续性方程、动量方程等组成的控制微分方程组,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,如一维的圆管层流和槽道流层流的解析分析,可根据求解问题的特性对方程及边界条件作相应简化获得解析解,大多数问题是得不到解析解的,这使理论解析法的工程应用受到很大的局限。因此,长期以来,流体力学的发展主要借助于物理模型的试验,但是,进行测试不是一项简单的工作。首先,需要专门的仪器和试验装置;其次,进行真实条件下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;再次,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点,以及探头本身对流场产生扰动,难以保证稳定的实验条件;第四,试验得到的结果一般有其适用范围;最后,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,采用对物理方程进行简单近似处理求得解析解的方法并不能满足其要求。而电子计算机、现代计算技术和数值计算方法的发展,则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。它是流体力学理论为基础,以数值方法为手段,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科学。

1.1.2 计算流体力学方法简介

计算流体力学的核心思想:利用数值模拟计算方法,离散和求解流动微分方程,从而获得流场内有限点上流动参数的近似值。即把原来在时间域及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。所有流体流动的基本规律包括质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。由它们可以分别导出连续性方程、动量方程和能量方程,得到纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)偏微分方程组,简称 N-S 方程组。N-S 方程组是流体流动所必须遵守的普遍规律。在守恒方程组基础上,加上反映流体流动特殊性质的数学模型(如湍流模型、燃烧模型、多相流模型等)和边界条件、初始条件,构成封闭的方程组来数学描述特定流场、流体的流动规律。具体的流场控制方程组分为 3 类:椭圆型、抛物型和双曲型偏微分方程组。从物理意义上概括地说,椭圆型方程与时间变量无关,仅与空间变量的二次导数项有关,一般用作描述定常情况的控制方程;抛物型与双曲型方程不仅与空间变量导数项有关,而且分别与时间变量的一阶和二阶导数项有关,用于描述非定常情况下的控制方程。

CFD 数值求解方法主要包括有限差分法、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、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仍占相当优势。虽然对 3 种不同类型方程,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使用有限元法,对抛物型和双曲型方程则使用有限体积法。目前流行的大型商业化 CFD 软件中只有 FIDAP 是使用有限元法的,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)来代替而形成离散方程的方法。由于各阶导数差分表达式可由 Taylor 级数展开而得,所以又称为 Taylor 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)。它将计算区域划分为一系列控制体积,将待解微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。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,是目前 CFD 应用最广的一种方法。目前的 CFD 商用软件大多也采用有限体积法。本书将主要介绍有限体积法。

1.1.3 计算流体力学的特点

对计算流体力学而言,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,计算域的几何形状任意,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,数值模拟的成本比起试验往往要低几个数量级。

(3) 速度快。在设定计算条件后,数值模拟流场所需时间之短是试验无法相比的,且能进行各种情况的模拟,以分析各种因素与流场的关系或确定优化工况。

(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) 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,其实际应用范围有限,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) 不像物理模型试验一开始能给出流动现象并定性的描述,数值模拟往往需要由原体检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,对于已有数学模型的描述,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 CFD 方法构成了研究流体流动及传热等问题的完整体系,但 3 类方法各有其适宜的应用范围,三者巧妙结合可互为补充和相得益彰。可以认为,科学技术发展到今天,把试验测定、理论分析与数值模拟有机而协调结合起来的方法,是研究流体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,比如,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 方法的核心。

(3) 编制程序和进行计算。这包括计算网格划分、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,这对检查和判断分析质量和结果有重要参考意义。

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 热物理过程研究对象——流体的基本特性

热物理过程研究的主要对象是流体,流体的性质及流动状态决定着 CFD 的计算模型及计算方法的选择,决定着流场各物理量的最终分布结果。

1.2.1 流体的密度、重度和比重

1. 流体的密度

空气比液体轻,油又比水轻,其原因就是空气的密度比液体小,油的密度又比水小。流体密度的定义是单位体积内所含物质质量的多少。若密度是均匀的,则有

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中, m 是体积为 V 的流体所含物质的质量。

对于密度不均匀的流体,其某一点处密度的定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

需注意: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。

2. 流体的重度

流体重度与流体密度有一个简单的关系式,即

$$\gamma = \rho g$$

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

3. 流体的比重

流体的比重定义为该流体的密度与 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的水的密度之比。

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的内部相互作用。

流体在静止时不能承受切应力,但在运动时,对相邻两层流体间的相对运动,即相对滑动速度却是有抵抗的,这种抵抗力称为粘性应力。把流体具有的这种抵抗两层流体间相对滑动速度或抵抗变形的性质,称为粘性。

粘性大小依赖于流体的性质,随温度而显著地发生变化。根据流体力学理论,粘性应

力的大小通常与粘性及相对速度成正比。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,所产生的粘性应力与其他类型的力(如惯性力)相比可忽略不计,此时,可以近似地把流体看成是无粘性的,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)。应该强调的是,真正的理想流体在客观实际中是不存在的,它只是实际流体在某种条件下的一种近似模型。

粘性流体又分为牛顿流体(Newtonian fluid)与非牛顿流体(non-Newtonian fluid)。内摩擦剪应力与速度变化率的关系满足牛顿内摩擦定律 $\tau = \mu(\partial u / \partial n)$ 时的流体称为牛顿流体,否则称为非牛顿流体。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。

1.2.3 流体的压缩性

流体的压缩性是指在外压压强或流体温度发生变化时,其密度和体积也会相应发生变化的特性。

在研究流体流动过程中,根据密度是否为常数,可将流体分为可压(compressible)流体与不可压(incompressible)流体两大类。当密度为常数时,流体为不可压流体,否则为可压流体。通常空气为可压流体,水为不可压流体。有些可压流体在特定的流动条件下,可以按不可压流体对待。相应的流动也可分为可压流动与不可压流动。

在可压流体的连续方程中含密度 ρ ,因而可把 ρ 视为连续方程中的独立变量进行求解,再根据流体的状态方程求出压力。不可压流体的压力场是通过连续方程间接规定的。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有其特殊的困难。

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。当流体中存在着温度差时,温度高的地方将向温度低的地方传送热量,这种现象称为热传导。同样地,当流体混合物中存在着组分的浓度差时,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。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,因此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。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。

管径为 d 的细玻璃管以倾角 θ 插入水中时,由于表面张力 σ 向上,能自动将管中的液柱提升一个高度 h ,则有

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g d}$$

例如,对于 20 ℃ 的水,水与玻璃的接触角 θ 为 0° ,表面张力 σ 为 0.073 N/m,水的密度 ρ 为 1 000 kg/m³,玻璃管的直径 d 为 5 mm,则水在玻璃管中的上升高度 h 为 6 mm。

1.2.6 流体的运动特性

1. 定常流动与非定常流动

根据流体流动过程中的流体物理量(如速度、压力、温度等)是否与时间有关,将流动分为定常(steady)与非定常(unsteady)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。动力机械启动和关停时的流体流动一般是非定常流动,而正常运转时可看作定常流动。

2. 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:

- (1) 随同其他质点的平动;
- (2) 自身的旋转运动;
- (3) 自身的变形运动(拉伸变形或剪切变形)。

在流动过程中,若流体质点自身做无旋转运动,则称流动是无旋的,也就是有势流动,否则就称流动是有旋流动。

3. 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掺混,而湍流是指流体不是处于分层流动状态。一般说来,湍流是普遍的,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,当 $Re \leq 2\,300$ 时,一定为层流;当 $Re \geq 8\,000 \sim 12\,000$ 时,一定为湍流;当 $2\,300 < Re < 8\,000$ 时,流动处于层流与湍流间的过渡区。

1.3 热物理过程控制微分方程

在热物理过程中,流体流动所遵循的物理定律是建立流体运动基本控制方程组的依据。这些定律主要包括:质量守恒、动量守恒、动量矩守恒、能量守恒、热力学第二定律,及状态方程和本构方程。在实际计算时还要考虑不同的流态,如层流与湍流。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。

热物理过程控制微分方程就是这些守恒定律的数学描述。