



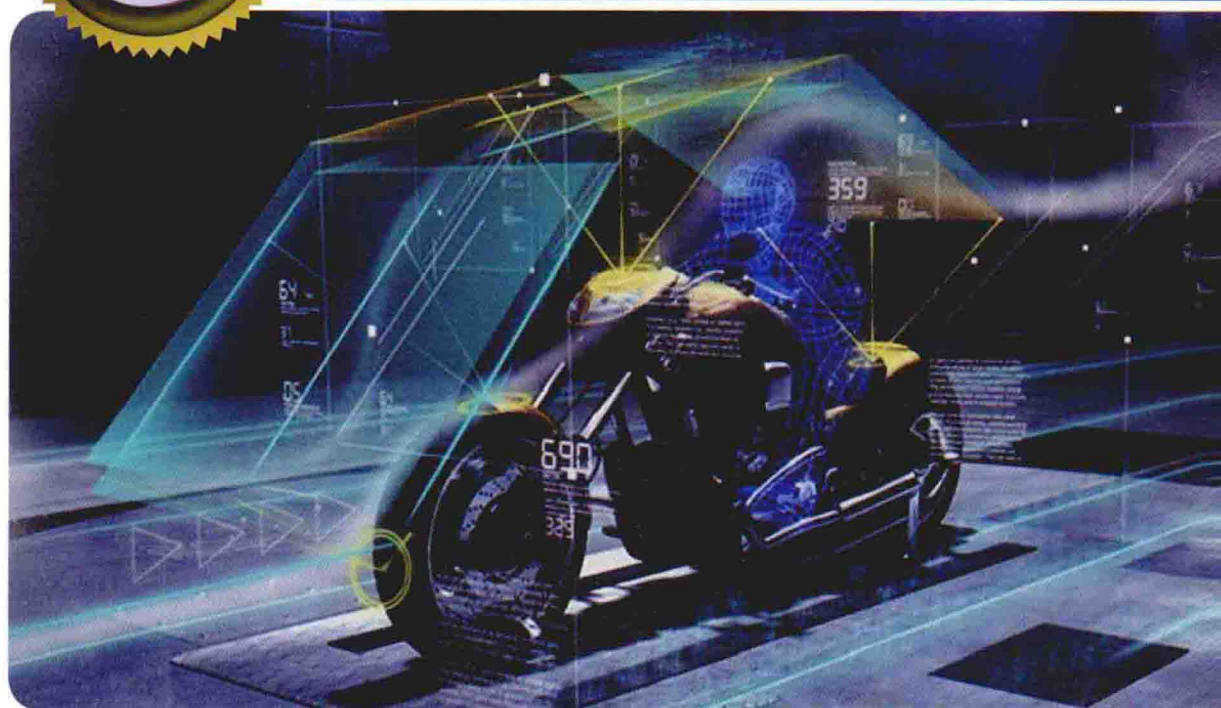
融合关键概念的深入讲解与实际案例的完整分析于一体，
操作更便捷，学习更快速！



总容量达**3.05GB**

1.11GB实例素材源文件

21个实例视频教学，总时长**290**分钟



FLUENT 14

流场分析

- › 系统掌握流场力学分析方法全过程，基础知识讲解—软件入门操作—高级应用提升—实例模拟练习，环环相扣，一气呵成。
- › 精选**21**个实例，融会贯通流场分析应用。

自学手册

张惠 康士廷 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



FLUENT 14

流场分析

自学手册

张惠 康士廷 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

FLUENT 14流场分析自学手册 / 张惠, 康士廷编著

— 北京: 人民邮电出版社, 2014. 7

(CAD/CAM/CAE自学手册)

ISBN 978-7-115-35047-3

I. ①F… II. ①张… ②康… III. ①流体力学—工程力学—计算机仿真—应用软件—手册 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第056845号

内 容 提 要

本书以 FLUENT 14.5 为平台讲解了流体力学的分析方法。全书共 13 章, 第 1 章讲解了流体力学基础; 第 2 章为流体流动分析软件的概述; 第 3 章讲解了 FLUENT 软件的操作方法; 第 4 章讲解了网格生成软件 GAMBIT 的操作方法; 第 5 章讲解了 Tecplot 软件入门使用方法; 第 6 章讲解了 FLUENT 的高级应用; 第 7 章~第 13 章为实例篇, 分别讲解了二维流动和传热的数值模拟、三维流动和传热的数值模拟、多相流模型、湍流分析、可动区域中流动问题的模拟、动网格及物资运输和有限速率化学反应模型模拟等工程问题中的方法。

本书所赠光盘包含了书中所有实例的源文件和视频文件, 以方便读者学习使用。

本书可作为科研院所流体力学研究人员, 流体力学相关专业硕士、博士、研究生或本科高年级学生的自学指导书或参考用书。

◆ 编 著 张 惠 康士廷

责任编辑 俞 彬

责任印制 彭志环 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 25

字数: 547 千字

印数: 1-3 500 册

2014 年 7 月第 1 版

2014 年 7 月河北第 1 次印刷

定价: 59.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



前 言

计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD), 用离散化的数值方法及电子计算机对流体无黏绕流和黏性流动进行数值模拟和分析。计算流体动力学是目前国际上一个强有力的研究领域, 是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术, 广泛应用于航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计、HAVC&R 等诸多工程领域, 板翅式换热器设计是 CFD 技术应用的重要领域之一。

计算流体力学的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展, 为简化流动模型的创建提供了更多的依据, 使很多分析方法得到了发展和完善。更重要的是计算流体力学采用它独有的、新的研究方法——数值模拟方法, 研究流体运动的基本物理特性。

FLUENT 是用于模拟具有复杂外形的流体流动以及热传导的计算机程序。它提供了完全的网格灵活性, 可以使用非结构网格, 例如二维三角形或四边形网格、三维四面体/六面体/金字塔形网格, 来解决具有复杂外形的流动。甚至可以用混合型非结构网格。它允许根据具体情况对网格进行修改 (细化/粗化)。

FLUENT 具有丰富的物理模型、先进的数值计算方法和强大的前后处理功能, 在航空航天、汽车设计、石油、天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛地应用。例如, 在石油、天然气工业上的应用就包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散与聚积、多相流、管道流动等。另外, 通过 FLUENT 提供的用户自定义函数可以改进和完善模型, 从而处理更加个性化的问题。

本书以 FLUENT14.5 为平台讲解了流体力学的分析方法。全书共 13 章, 第 1 章讲解了流体力学基础; 第 2 章为流体流动分析软件的概述; 第 3 章讲解了 FLUENT 软件的操作方法; 第 4 章讲解了网格生成软件 GAMBIT 的操作方法; 第 5 章讲解了 Tecplot 软件入门使用方法; 第 6 章讲解了 FLUENT 的高级应用; 第 7 章~第 13 章为实例篇, 分别讲解了二维流动和传热的数值模拟、三维流动和传热的数值模拟、多相流模型、湍流分析、可动区域中流动问题的模拟、动网格及物质运输和有限速率化学反应模型模拟等工程问题中的方法。

本书由三维书屋工作室总策划, 主要由华北电力大学可再生能源学院的张惠老师和石家庄三维书屋文化传播有限公司的康士廷老师编写。另外, 王义发、胡仁喜、王敏、王艳池、王玉秋、王培合、刘昌丽、熊慧、张日晶、王艳池、卢园、闫聪聪、孟培等也为本书的出版提供了必要的

帮助，在此一并表示感谢。如果读者在学习本书的过程中有需要咨询的问题，可登录网站 www.sizswsw.com 或发电子邮件到编者信箱 win760520@126.com。同时，也欢迎广大读者就本书提出宝贵意见和建议，我们将竭诚为您服务，并努力改正。

编者

2013年11月

目录

第 1 章 流体力学基础 1

1.1 流体力学基本概念	2
1.1.1 连续介质的概念	2
1.1.2 流体的基本性质	2
1.1.3 作用在流体上的力	4
1.1.4 研究流体运动方法	4
1.2 流体运动的基本概念	5
1.2.1 层流流动与紊流流动	5
1.2.2 有旋流动与无旋流动	6
1.2.3 声速与马赫数	6
1.2.4 膨胀波与激波	7
1.3 附面层理论	8
1.3.1 附面层概念及附面层厚度	9
1.3.2 附面层微分方程	9
1.4 流体运动及换热的多维方程组	10
1.4.1 物质导数	10
1.4.2 不同形式的 N-S 方程	10
1.4.3 能量方程与导热方程	13
1.5 湍流模型	13
1.6 计算网格与边界条件	17
1.6.1 计算网格	17
1.6.2 边界条件	17

第 2 章 流体流动分析软件概述 19

2.1 CFD 软件简介	20
2.1.1 CFD 软件结构	20

2.1.2 CFD 基本模型	22
2.1.3 常用的 CFD 商用软件	25
2.2 FLUENT 软件介绍	28
2.2.1 FLUENT 系列软件介绍	28
2.2.2 FLUENT 的功能及特点	30
2.3 FLUENT14.5 软件包的安装以及 运行	33
2.3.1 FLUENT14.5 软件包的安装	33
2.3.2 FLUENT14.5 软件包的运行	34
2.4 FLUENT14.5 的功能模块和分析 过程	35
2.4.1 FLUENT14.5 的功能模块	35
2.4.2 FLUENT14.5 的分析过程	37

第 3 章 FLUENT 软件的操作使用 40

3.1 FLUENT14.5 的操作界面	41
3.1.1 FLUENT14.5 启动界面	41
3.1.2 FLUENT14.5 图形用户界面	41
3.1.3 FLUENT14.5 文本用户界面及 Scheme 表达式	44
3.2 FLUENT14.5 对网格的基本操作	45
3.2.1 导入和检查网络	46
3.2.2 显示和修改网格	49
3.3 选择 FLUENT14.5 求解器及运行 环境	55
3.3.1 FLUENT14.5 求解器的比较与选择	55
3.3.2 FLUENT14.5 计算模式的选择	56
3.3.3 FLUENT14.5 运行环境的选择	57
3.3.4 FLUENT14.5 的基本物理模型	58
3.3.5 FLUENT14.5 的材料定义	64
3.4 设置 FLUENT14.5 的边界条件	65
3.5 设置 FLUENT14.5 的求解参数	81



第4章 网格生成软件 GAMBIT.....84

- 4.1 GAMBIT 的简介.....85
 - 4.1.1 GAMBIT 的功能及特点.....85
 - 4.1.2 GAMBIT 的操作界面.....86
- 4.2 GAMBIT 的操作步骤.....89
 - 4.2.1 建立几何模型.....89
 - 4.2.2 划分网格.....92
 - 4.2.3 定义边界.....94
 - 4.2.4 GAMBIT 与其他软件的联用.....96
- 4.3 GAMBIT 的应用实例.....96
 - 4.3.1 三维直通管内的湍流模型与网格划分.....96
 - 4.3.2 二维轴对称喷嘴模型与网格划分.....99
 - 4.3.3 三维 V 型管道模型与网格划分.....102

第5章 Tecplot 软件使用入门.....105

- 5.1 Tecplot 概述.....106
 - 5.1.1 Tecplot 软件的启动.....106
 - 5.1.2 Tecplot 的界面.....106
- 5.2 Tecplot 绘图环境设置.....111
 - 5.2.1 帧的创建和编辑.....111
 - 5.2.2 网格和标尺的设定.....112
 - 5.2.3 坐标系.....112
- 5.3 Tecplot 使用技巧.....113
 - 5.3.1 XY 曲线图显示.....113
 - 5.3.2 二维视图显示.....115
 - 5.3.3 三维视图显示.....119
- 5.4 Tecplot 的数据格式.....121
 - 5.4.1 Tecplot 数据层次.....121
 - 5.4.2 多数据区域.....122
 - 5.4.3 数据区域中的数据结构.....123

- 5.5 Tecplot 对 FLUENT 数据进行后处理.....123
 - 5.5.1 Tecplot 读取 FLUENT 文件数据.....123
 - 5.5.2 Tecplot 后处理实例——三维弯管水流速度场模拟.....125

第6章 FLUENT 高级应用.....132

- 6.1 UDF 概述.....133
 - 6.1.1 UDF 基础知识.....133
 - 6.1.2 UDF 能够解决的问题.....133
 - 6.1.3 UDF 宏.....134
 - 6.1.4 UDF 的预定义函数.....136
 - 6.1.5 UDF 的编写.....141
- 6.2 UDS 基础知识.....141
- 6.3 并行计算.....144
 - 6.3.1 开启并行求解器.....145
 - 6.3.2 使用并行网络工作平台.....145
 - 6.3.3 分割网格.....146
 - 6.3.4 检测并提高并行性能.....150

第7章 二维流动和传热的数值模拟.....152

- 7.1 套管式换热器的流动和传热的模拟.....153
 - 7.1.1 利用 GAMBIT 创建模型.....153
 - 7.1.2 网格的划分.....155
 - 7.1.3 边界条件和区域的设定.....156
 - 7.1.4 网格的输出.....157
 - 7.1.5 利用 FLUENT 求解器求解.....157
- 7.2 二维三通管内流体的流动分析.....165
 - 7.2.1 利用 GAMBIT 创建模型.....166
 - 7.2.2 网格的划分.....167
 - 7.2.3 计算求解.....169

7.3	U 形弯管内流体运动分析	178
7.3.1	利用 GAMBIT 创建模型	179
7.3.2	网格的划分	180
7.3.3	计算求解	181

第 8 章 三维流动和传热的数值模拟 185

8.1	三维喷管流的数值模拟	186
8.1.1	利用 GAMBIT 创建三维喷管模型	186
8.1.2	划分网格	193
8.1.3	边界条件和区域的设定	195
8.1.4	输入网格文件	196
8.1.5	利用 FLUENT 进行三维喷管流	197
8.2	混合器流动和传热的数值模拟	207
8.2.1	利用 GAMBIT 创建模型	208
8.2.2	网格划分	211
8.2.3	区域和边界条件的设置	212
8.2.4	网格输出	213
8.2.5	利用 FLUENT 求解器求解	213
8.2.6	后处理	222
8.3	三维流-固耦合散热模拟	229
8.3.1	利用 GAMBIT 创建模型	229
8.3.2	网格划分	231
8.3.3	利用 FLUENT 求解器求解	231

第 9 章 多相流模型 241

9.1	FLUENT 中的多相流模型	242
9.1.1	VOF 模型	242
9.1.2	Mixture 模型	243
9.1.3	Eulerian 模型	244
9.2	明渠流动的 VOF 模型模拟实例	244
9.2.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	245
9.2.2	利用 GAMBIT 划分网格	248

9.2.3	利用 GAMBIT 初定边界	249
9.2.4	网格的输出	250
9.2.5	利用 FLUENT 求解器求解	250
9.2.6	VOF 模型的设定过程	250
9.2.7	模型初始化	258
9.2.8	设定观看录像	259
9.2.9	保存 Case 和 Data 文件	260
9.2.10	迭代计算	260
9.2.11	FLUENT 14.5 自带后处理	261
9.3	水油混合物 T 形管流动模拟实例	262
9.3.1	建立模型	263
9.3.2	划分网格	264
9.3.3	求解计算	264
9.4	液相凝固温度模拟	269
9.4.1	利用 GAMBIT 创建几何模型	269
9.4.2	利用 GAMBIT 划分网格	270
9.4.3	求解计算	270

第 10 章 湍流分析 274

10.1	湍流模型概述	275
10.1.1	单方程 (Spalart-Allmaras) 模型	275
10.1.2	标准 $k-\epsilon$ 模型	276
10.1.3	重整化群 (RNG) $k-\epsilon$ 模型	277
10.1.4	可实现 $k-\epsilon$ 模型	277
10.1.5	Reynolds 应力模型	278
10.1.6	大涡模拟	279
10.2	风绕柱形塔定常流动分析实例	280
10.2.1	创建模型	281
10.2.2	网格划分	285
10.2.3	边界条件和区域的设定	286
10.2.4	网格的输出	287
10.2.5	利用 FLUENT 求解器求解	287

10.3 风绕柱形塔非定常流动分析实例	297
10.3.1 选择计算模型	297
10.3.2 后处理	301

第 11 章 可动区域中流动问题的模拟

11.1 无旋转坐标系的三维旋转流动	305
11.1.1 利用 GAMBIT 创建几何模型	305
11.1.2 利用 GAMBIT 划分网格	308
11.1.3 利用 GAMBIT 初定边界	310
11.1.4 利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	312
11.1.5 利用 FLUENT 14.5 导入 Mesh 文件	312
11.1.6 计算模型的设定过程	313
11.1.7 模型初始化	319
11.1.8 迭代计算	320
11.1.9 FLUENT 14.5 自带后处理	320
11.2 单一旋转坐标系中三维旋转流动	323
11.2.1 利用 FLUENT 14.5 导入 Case 文件	323
11.2.2 $\Omega=\omega/2$ 涡动模型的修改和计算	324
11.2.3 $\Omega=\omega$ 涡动模型的修改和计算	327
11.3 滑移网格实例分析——十字 搅拌器流场模拟	330
11.3.1 建立模型	331
11.3.2 划分网格	331
11.3.3 求解计算	332

第 12 章 动网格模型的模拟

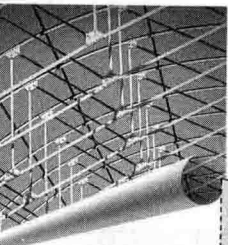
12.1 动网格模型概述	338
12.2 用动网格方法模拟隧道中 两车相对行驶的流场	340

12.2.1 利用 GAMBIT 创建几何模型	340
12.2.2 利用 GAMBIT 划分网格	341
12.2.3 利用 GAMBIT 初建边界条件	342
12.2.4 利用 GAMBIT 导出 Mesh 文件	343
12.2.5 利用 FLUENT 14.5 导入 Mesh 文件	344
12.2.6 动网格计算模型的设定过程	344
12.2.7 模型初始化	347
12.2.8 迭代计算	348
12.2.9 FLUENT 14.5 自带后处理	349
12.3 三维活塞在汽缸中的运动模拟 实例	350
12.3.1 建立模型	351
12.3.2 网格的划分	351
12.3.3 求解计算	352

第 13 章 物质运输和有限速率化学

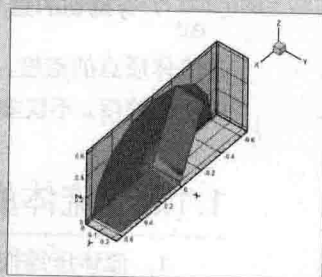
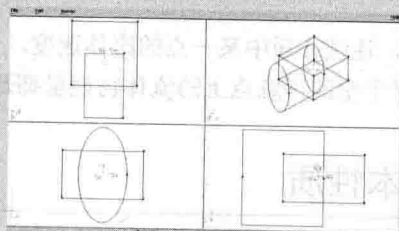
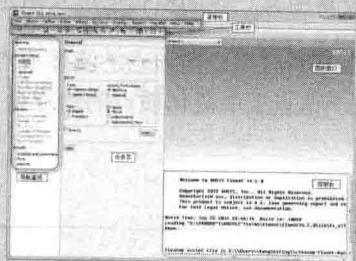
反应模型模拟

13.1 有限速率化学反应	363
13.1.1 化学反应模型概述	363
13.1.2 有限速率化学反应的设置	367
13.1.3 PDF 输运模型	370
13.2 乙烷燃烧模拟实例	372
13.2.1 利用 GAMBIT 创建模型	373
13.2.2 网格的处理	375
13.2.3 利用 FLUENT 求解器求解	376
13.2.4 采用变比热容的解法	385
13.2.5 后处理	387



第1章

流体力学基础





1.1

流体力学基本概念



本节简要讲解流体的连续介质模型、基本性质以及研究流体运动的方法。

1.1.1 连续介质的概念

气体与液体都属流体。从微观角度讲,无论是气体还是液体,分子间都存在间隙,同时由于分子的随机运动,导致不但流体的质量在空间上的分布是不连续的,而且任意空间点上流体物理量相对时间也是不连续的。但是从宏观的角度考虑,流体的结构和运动又表现出明显的连续性与确定性,而流体力学研究的正是流体的宏观运动。在流体力学中,正是用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。1753年欧拉首先采用了“连续介质”作为宏观流体模型,将流体看成是由无限多流体质点组成的稠密而无间隙的连续介质,这个模型被称为连续介质模型。

流体的密度定义为:

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

式中, ρ 为流体密度, m 为流体质量, V 为质量 m 的流体所占的体积。对于非均质流体,流体中任一点的密度定义为:

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow \Delta v_0} \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad (1-2)$$

上式中, Δv_0 是设想的一个最小体积,在 Δv_0 内包含足够多的分子,使得密度的统计平均值 ($\frac{\Delta m}{\Delta v}$) 有确切的意义。这个 Δv_0 就是流体质点的体积,所以连续介质中某一点的流体密度实质上是流体质点的密度,同样,连续介质中某一点的流体速度,是指在某瞬时质心在该点的流体质点的质心速度。不仅如此,对于空间任意点上的流体物理量都是指位于该点上的流体质点的物理量。

1.1.2 流体的基本性质

1. 流体压缩性

流体体积随作用于其上的压强的增加而减小的特性称为流体的压缩性,通常用压缩系数 β 来度量。它具体定义为:在一定温度下,升高单位压强时流体体积的相对缩小量,即:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-3)$$

纯液体的压缩性很差, 通常情况下可以认为液体的体积和密度是不变的。对于气体, 其密度随压强的变化是和热力过程有关的。

2. 流体的膨胀性

流体体积随温度的升高而增大的特性称为流体的膨胀性, 通常用膨胀系数 α 度量, 它定义为: 在压强不变的情况下, 温度上升 1°C 流体体积的相对增加量, 即:

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-4)$$

一般来说, 液体的膨胀系数都很小, 通常情况下工程中不考虑它们的膨胀性。

3. 流体的黏性

在作相对运动的两流体层的接触面上存在一对等值而且反向的力, 阻碍两相邻流体层的相对运动, 流体的这种性质叫做流体的黏性, 由黏性产生的作用力叫做黏性阻力或内摩擦力。黏性阻力产生的物理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。根据牛顿内摩擦定律, 两层流体间的切应力表达式为:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad (1-5)$$

式中, τ 为切应力, μ 为动力黏性系数, 与流体种类和温度有关, $\frac{dV}{dy}$ 为垂直于两层流体接触面上的速度梯度。符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。

黏性系数受温度的影响很大: 当温度升高时, 液体的黏性系数减小, 黏性下降, 而气体的黏性系数增大, 黏性增加。压强不是很高时, 黏性系数受压强的影响很小, 只有当压强很高(如几十个兆帕)时, 才需要考虑压强对黏性系数的影响。

4. 流体的导热性

当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时, 温度高的地方与温度低的地方之间会发生热量传递。热量传递有热传导、热对流、热辐射 3 种形式。当流体在管内高速流动时, 在紧贴壁面的位置会形成层流底层, 液体在该处相对壁面的流速很低, 几乎可看作是零, 所以与壁面进行的主要是热传导, 而层流以外的区域的热传递形势主要是热对流。

单位时间内通过单位面积由热传导所传递的热量可按傅立叶导热定律确定, 表达式为:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-6)$$

式中, n 为面积的法线方向, $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为沿 n 方向的温度梯度, λ 为导热系数, 负号表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

通常情况下, 流体与固体壁面间的对流换热量可用下式表达:

$$q = h(T_1 - T_2) \quad (1-7)$$

式中, h 为对流换热系数, 与流体的物性、流动状态等因素有关, 主要是依靠试验数据得出的经验公式来确定。

1.1.3 作用在流体上的力

作用在流体上的力可分为质量力与体积力两类。所谓质量力 (或称体积力) 是指作用在体积 V 内每一液体质量 (或体积) 上的非接触力, 其大小与流体质量成正比。重力、惯性力和电磁力都属于质量力。所谓表面力是指作用在所取流体体积表面 S 上的力, 它是由与这块流体相接触的流体或物体的直接作用而产生的。

在流体表面围绕 M 点选取一微元面积, 作用在其上的表面力用 ΔF_s 表示, 将 ΔF_s 分解为垂直于微元表面的法向力 ΔF_n 和平行于微元表面的切向力 ΔF_t 。在静止流体或运动的理想流体中, 表面力只存在垂直于表面上的法向力 ΔF_n , 这时, 作用在 M 点周围单位面积上的法向力就定义为 M 点上的流体静压强, 即:

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow \Delta S_0} \frac{\Delta \vec{F}_n}{\Delta S} \quad (1-8)$$

式中, ΔS_0 为和流体质点的体积具有相比拟尺度的微小面积。静压强又常称为静压。

流体静压强具有两个重要特性:

- (1) 流体静压强的方向总是和作用面相垂直, 并且指向作用面。
- (2) 在静止流体或运动理想流体中, 某一点静压强的大小各向相等, 与所取作用面的方位无关。

1.1.4 研究流体运动方法

在研究流体运动时有两种不同的方法, 一个是从分析流体各个质点的运动入手, 来研究整个流体的运动。另一个是从分析流体所占据的空间中各固定点处的流体运动入手, 来研究整个流体的运动。

在任意空间点上, 流体质点的全部流动参数, 例如速度、压强、密度等都不随时间而改变, 这种流动称为定常流动; 若流体质点的全部或部分流动参数随时间的变化而改变, 则称为非定常流动。

人们常用迹线或流线的概念来描述流场: 任何一个流体质点在流场中的运动轨迹称为迹线, 迹线是某一流体质点在一段时间内所经过的路径, 是同一流体质点不同时刻所在位置的连线; 流线是某一瞬间各流体质点的运动方向线, 在该曲线上各点的速度矢量相切于这条曲线。在定常流中, 流动与时间无关, 流线不随时间改变, 流体质点沿着流线运动, 流线与迹线重合。对于非定常流, 迹线与流线是不同的。

下面为一维定常流的 3 个基本方程。

(1) 连续 (质量) 方程。连续方程是把质量守恒定律应用于流体所得的数学表达式。一维定常流连续方程的微分形式为:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (1-9)$$

连续方程是质量守恒的数学表达式,与流体的性质、黏性作用、其他外力作用、外加热无关。

(2) 动量方程。动量方程是把牛顿第二定律应用于运动流体所得到的数学表达式。此定律可表述为在某一瞬时,体系的动量对时间的变化率等于该瞬时作用在该体系上的全部外力的合力,而且动量的时间变化率的方向与合力的方向相同。

设环境对瞬时占据控制体内的流体的全部作用力为 $\sum \vec{F}$, 则根据牛顿第二定律得到:

$$\sum \vec{F} = m(\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \quad (1-10)$$

上式就是牛顿第二运动定律适用于控制体时的形式。它说明在定常流中,作用在控制体上的全部外力的合力 $\sum \vec{F}$, 应等于从控制面2流体动量的流出率与控制面1流体动量的流入率的差值。研究流体在流动过程中的详细变化情况时,需要知道微分形式的动量方程:

$$\rho g dz + dp + \rho V dV = 0 \quad (1-11)$$

上式是无黏流体一维定常流动的运动微分方程,它表明沿任一根流线,流体质点的压强、密度、速度和位移之间的微分关系。

(3) 能量方程。能量方程是热力学第一定律应用于流动流体所得到的数学表达式。不可压无黏流体的绝能定常流动的能量方程表达式为:

$$g dz + d\left(\frac{p}{\rho}\right) + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0 \quad (1-12)$$

1.2

流体运动的基本概念



本节简要介绍流体运动的几个基本概念,这些概念都是有关流体运动的最基本的术语,读者有必要了解一下。

1.2.1 层流流动与紊流流动

当流体在圆管中流动时,如果管中流体是一层一层流动的,各层间互不干扰、互不相混的,这样的流动状态称为层流流动。当流速逐渐增大时,流体质点除了沿管轴向运动外,还有垂直于管轴向方向的横向流动,即层流流动已被打破,完全处于无规则的乱流状态,这种流动状态称为紊流或湍流。流动状态发生变化(从层流到紊流)时的流速称为临界速度。



大量实验数据与相似理论证实, 流动状态不仅取决于临界速度, 而是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数来决定的。雷诺数 Re 定义为:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (1-13)$$

式中, d 为管道直径, V 为平均流速, μ 为动力黏性系数。

由层流开始转变到紊流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数, 用 Re'_{cr} 表示; 由紊流转变到层流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 与临界雷诺数, 就可确定黏性流体的流动状态。

(1) 当 $Re < Re_{cr}$ 时, 流动为层流状态。

(2) 当 $Re > Re'_{cr}$ 时, 流动为紊流状态。

(3) 当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时, 可能为层流状态, 也可能为紊流状态。

在工程应用中, 取 $Re_{cr} = 2000$ 。当 $Re < 2000$ 时, 流动为层流运动, 当 $Re > 2000$ 时, 流动为紊流运动。

实际上, 雷诺数反映了惯性力与黏性力之比, 雷诺数越小, 表明流体黏性力作用越大, 能够减弱引起紊流流动的扰动, 保持层流状态; 雷诺数越大, 表明惯性力对流体的作用越明显, 易使流体质点发生紊流流动。

1.2.2 有旋流动与无旋流动

有旋流动是指流场中各处的旋度 (流体微团的旋转角速度) 不等于零的流动, 无旋流动是指流场中各处的旋度都为零的流动。流体质点的旋度是一个矢量, 用 ω 表示, 其表达式为:

$$\omega = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1-14)$$

若 $\omega = 0$, 则称流动为无旋流动, 否则为有旋流动。

流体运动是有旋还是无旋, 取决于流体微团是否有旋转运动, 与流体微团的运动轨迹无关。流体流动中, 如果考虑黏性, 由于存在摩擦力, 这时流动为有旋流动; 如果黏性可以忽略, 而流体本身又是无旋流, 如均匀流, 这时流动为无旋流动。例如均匀气流流过平板, 在紧靠壁面的附面层内, 需要考虑黏性影响。因此, 附面层内为有旋流动, 附面层外的流动, 黏性可以忽略, 因此可视为无旋流动。

1.2.3 声速与马赫数

声速是指微弱扰动波在流体介质中的传播速度, 它是流体可压缩性的标志, 对于确定可压缩流的特性和规律起着重要作用。声速表达式的微分形式为:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-15)$$

当声音在气体中传播时, 由于在微弱扰动的传播过程中, 气流的压强、密度和温度的变化都是无限小量, 若忽略黏性作用, 整个过程接近可逆过程, 同时该过程进行得很迅速, 又接近一个绝热过程, 所以微弱扰动的传播可以认为是一个等熵的过程。对于完全气体, 声速又可表示为:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (1-16)$$

式中, k 为比热比, R 为气体常数。

上述公式只能用来计算微弱扰动的传播速度。对于强扰动, 如激波、爆炸波等, 其传播速度比声速大, 并随波的强度增大而加快。

流场中某点处气体流速 V 与当地声速 c 之比称为该点处气流的马赫数, 用 Ma 表示, 其表达式为:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1-17)$$

马赫数表示气体宏观运动的动能与气体内部分子无规则运动的动能 (即内能) 之比。当 $Ma \leq 0.3$ 时, 密度的变化可以忽略, 当 $Ma > 0.3$ 时, 就必须考虑气流压缩性的影响。因此, 马赫数是研究高速流动的重要参数, 是划分高速流动类型的标准。当 $Ma > 1$ 时, 为超声速流动, 当 $Ma < 1$ 时, 为亚声速流动, 当 $Ma \approx 1$ 时, 为跨声速流动, 当 $Ma > 3$ 时, 为超高声速流动。超声速流动与亚声速流动的规律有本质的区别, 跨声速流动兼有超声速与亚声速流动的某些特点, 是更复杂的流动。

1.2.4 膨胀波与激波

膨胀波与激波是超声速气流特有的重要现象, 超声速气流在加速时要产生膨胀波, 减速时一般会出现激波。

当超声速气流流经由微小外折角所引起的马赫波时, 气流加速, 压强和密度下降, 这种马赫波就是膨胀波。超声速气流沿外凸壁流动的基本微分方程表达式为:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\theta}{\sqrt{Ma^2 - 1}} \quad (1-18)$$

当超声速气流绕物体流动时, 在流场中往往出现强压缩波, 即激波。气流经过激波后, 压强、温度和密度均突然升高, 速度则突然下降。超声速气流被压缩时一般都会产生激波, 所以激波是超声速气流中的重要现象之一。按照激波的形状, 可将激波分为以下 3 类。

(1) 正激波: 气流方向与波面垂直。

(2) 斜激波: 气流方向与波面不垂直。例如, 当超声速气流流过楔形物体时, 在物体前缘往往会产生斜激波。

(3) 曲线激波: 波形为曲线形。

设激波前的气流速度、压强、温度、密度和马赫数分别为 v_1 , p_1 , T_1 , ρ_1 和 Ma , 经过激波后突然增加到 v_2 , p_2 , T_2 和 ρ_2 , 则激波前后气流应满足以下方程。

连续性方程:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (1-19)$$

动量方程:

$$p_2 - p_1 = \rho_1 v_1^2 - \rho_2 v_2^2 \quad (1-20)$$

能量方程 (绝热):

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-21)$$

状态方程:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-22)$$

据此, 可得出激波前后参数的关系:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} Ma_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \quad (1-23)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{k-1}{k+1} + \frac{2}{(k+1) Ma_1^2} \quad (1-24)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} Ma_1^2}{\frac{2}{k-1} + Ma_1^2} \quad (1-25)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{2k Ma_1^2 - k + 1}{k + 1} \right) \left(\frac{2 + (k-1) Ma_1^2}{(k+1) Ma_1^2} \right) \quad (1-26)$$

$$\frac{Ma_2^2}{Ma_1^2} = \frac{Ma_1^{-2} + \frac{k-1}{2}}{k Ma_1^2 - \frac{k-1}{2}} \quad (1-27)$$

1.3

附面层理论



附面层是流体力学中经常要涉及的一个概念, 下面进行简要介绍。