

江帆 徐勇程 黄鹏 编著



(第2版)

Fluent

高级应用与实例分析

清华大学出版社

江帆 徐勇程 黄鹏 编著

Fluent

高级应用与实例分析

(第2版)



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是 Fluent 在多相流、动网格、滑移网格、多孔介质等高级应用方面的指导性教材,全书共分 16 章,第 1 章介绍 CFD 基础,第 2 章至第 4 章分别为 Fluent 基本介绍、网格划分及通用后处理 Tecplot 的使用入门,第 5 章介绍多相流基本模型,第 6 章为多相流计算实例,第 7 章为动网格计算方法概述,第 8 章为 UDF 使用指南,第 9 章为动网格计算实例,第 10 章为滑移网格基础,第 11 章为滑移网格的计算实例,第 12 章为 UDF 的高级用法,第 13 章为开发基于 ICEM 与 Fluent 的定制数值模拟软件,第 14 章为流固耦合及其实例分析,第 15 章为多孔介质及其实例分析,第 16 章为 Fluent 拓展应用实例。书中以详细的实例方式说明 Fluent 高级应用的计算操作,多数案例来源于作者们的科研项目或与企业合作项目,具有较强的实用性。

本书可作为水利、动力、能源、航空、冶金、环境、建筑、机械、材料、流体工程等专业领域的研究生和本科生教材,也可供上述领域的科研人员,特别是进行 CFD 应用研究的人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

Fluent 高级应用与实例分析/江帆,徐勇程,黄鹏编著.—2 版.—北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-50263-0

I. ①F… II. ①江… ②徐… ③黄… III. ①流体力学—工程力学—计算机仿真—应用软件
IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 114714 号

责任编辑:赵 斌
封面设计:常雪影
责任校对:刘玉霞
责任印制:董 瑾

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:28.5

字 数:691 千字

版 次:2008 年 7 月第 1 版 2018 年 6 月第 2 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:69.80 元

产品编号:077729-01

第2版前言

Foreword

本书针对 Fluent 高层次学习的需要而编写,第 1 版自 2008 年出版以来,受到许多读者的厚爱,在中国知网检索被引用 2000 多次。实际使用中,读者和作者发现第 1 版存在一些错误,且 Fluent 软件版本升级,原操作不能适应时代的需求。今年在清华大学出版社的支持下,本书进行了一次较大规模的更新,以期能够为读者带来一些帮助。

本次更新主要做了以下工作:①修订了第 1 版中存在的错误;②多相流理论、湍流模型、动网格理论及实例操作等作了适应 Fluent 18.0 的更新;③更换网格划分及二次开发的内容,与当前技术发展相适应;④删除了关于多核并行的内容,因为新版本并行设置非常容易;⑤增加了应用案例,如多孔介质、流固耦合、离散相、沸腾传热、微流动等方面的工程案例,使案例更丰富、涉及领域更广,有些案例给出了实验结果(并给出实验结果的参考文献)对比,便于读者进一步研究。

更新后的全书共分 16 章,第 1 章介绍 CFD 基础,第 2 章至第 4 章分别为 Fluent 基本介绍、网格划分及通用后处理 Tecplot 的使用入门,第 5 章介绍多相流基本模型,第 6 章为多相流计算实例,第 7 章为动网格计算方法概述,第 8 章为 UDF 使用指南,第 9 章为动网格计算实例,第 10 章为滑移网格基础,第 11 章为滑移网格的计算实例,第 12 章为 UDF 的高级用法,第 13 章为开发基于 ICEM 与 Fluent 的定制数值模拟软件,第 14 章为流固耦合及其实例分析,第 15 章为多孔介质及其实例分析,第 16 章为 Fluent 拓展应用实例。书中多数案例来源于作者们的科研项目或与企业合作项目。

本次改版过程中,徐勇程、卢浩然、陈玉梁、祁肖龙等研究生处理了大量的实例操作更新和文字编辑工作,理论更新、二次开发等方面由江帆与黄鹏完成,全书由江帆、徐勇程统稿。

本书部分材料来源于百度、流体中文网、小木虫、流沙 CAE 等论坛或博客,感谢这些网友所做的工作。本书的编写得到作者的三位导师田红旗教授、陈维平教授、李元元教授的支持,也得到广州大学机电工程系和肇庆学院电气工程系老师们的支持。同时,黄永安教授、作者们的父母和家人也给予了大力支持,在此一并致以深深的谢意!

本书既是利用 Fluent 软件进行高级应用分析的工程技术人员进行相关计算的指导书,又可作为高等院校相关专业本科和硕士研究生的流动模拟教学、复杂流动问题研究的参考书,本书相关实例的 sat、step、msh、cas、dat 文件与相关源程序及操作视频已上传至清华大学出版社电子出版系统,扫描书中二维码即可获得相关资料。限于编者的水平,书中难免有不当之处,还请广大读者给予指正,并请致信 jiangfan2008@126.com 或 983630935@qq.com,我们将不胜感激。

江 帆

2018 年 3 月于广州

目录

Contents

第 1 章	CFD 基础	1
1.1	流体力学的基本概念	1
1.1.1	流体的连续介质模型	1
1.1.2	流体的性质	1
1.1.3	流体力学中的力与压强	3
1.1.4	流体运动的描述	4
1.2	CFD 基本模型	8
1.2.1	基本控制方程	9
1.2.2	湍流模型	11
1.2.3	初始条件和边界条件	19
1.3	CFD 模型的离散——有限体积法	21
1.3.1	CFD 模型的数值求解方法概述	21
1.3.2	有限体积法	22
1.3.3	有限体积法中常用的离散格式	29
1.4	流场数值计算算法分析	30
1.4.1	SIMPLE 算法详解	31
1.4.2	其他算法介绍	38
第 2 章	Fluent 基本介绍	47
2.1	Fluent 概述	47
2.1.1	Fluent 软件功能	47
2.1.2	Fluent 的文件类型	48
2.1.3	Fluent 的特点	48
2.2	Fluent 的操作界面	50
2.2.1	图形用户界面(GUI)	50
2.2.2	文本用户界面(TUI)及 Scheme 表达式	51
2.2.3	图形控制及鼠标使用	54
2.3	Fluent 简单操作实例	55
2.3.1	Fluent 计算流程	55
2.3.2	简单流动与传热的计算	55

第3章 网格划分	70
3.1 Mesh 模块简介	70
3.1.1 Mesh 界面与功能	70
3.1.2 模型导入后相关操作	77
3.1.3 网格生成	80
3.2 Mesh 网格划分实例	91
3.2.1 二维油水环状流阀门管道网格划分	91
3.2.2 三维油水环状流阀门管道网格划分	94
3.3 ICEM CFD 功能及界面	97
3.3.1 特点及功能	97
3.3.2 基本界面	97
3.3.3 ICEM CFD 的文件组成	100
3.3.4 ICEM CFD 中鼠标的使用	101
3.3.5 ICEM CFD 网格生成流程	101
3.4 ICEM CFD 网格划分简介	101
3.4.1 结构化网格	101
3.4.2 非结构化网格	102
3.4.3 混合格网	102
3.4.4 网格质量	103
3.5 ICEM 非结构网格划分及实例	103
3.5.1 非结构化网格基础	103
3.5.2 二维网格生成——分叉管非结构网格划分	104
3.5.3 三维网格生成——分支管非结构网格划分	109
3.6 ICEM CFD 结构网格划分及实例	111
3.6.1 结构化网格基础	111
3.6.2 二维网格生成——U-pipe 结构网格划分	115
3.6.3 三维网格生成——三叉管结构网格划分	118
第4章 通用后处理 Tecplot 的使用入门	122
4.1 Tecplot 基本功能	122
4.1.1 Tecplot 的界面	122
4.1.2 基本功能	125
4.2 Tecplot 的数据格式	126
4.2.1 Tecplot 数据层次	126
4.2.2 多数据区域	128
4.2.3 数据区域中的数据结构	128
4.3 Tecplot 对 Fluent 数据进行后处理	132
4.3.1 Tecplot 识别的数据格式	132

4.3.2	Tecplot 读取 Fluent 文件步骤	133
4.4	Tecplot 绘图环境设置	134
4.4.1	网格和标尺的设定	134
4.4.2	坐标系统	135
4.5	Tecplot 使用实例	135
4.5.1	绘制 XY 曲线	135
4.5.2	绘制矢量图	137
4.5.3	绘制等值线图	137
4.5.4	绘制流线图	142
4.5.5	绘制散点图	143
4.5.6	绘制三维流场图	146
第 5 章	多相流基本模型	148
5.1	VOF 模型	148
5.1.1	VOF 模型概述及其局限	148
5.1.2	控制方程	149
5.2	混合模型	154
5.2.1	混合模型概述及其局限	154
5.2.2	控制方程	155
5.3	欧拉模型	157
5.3.1	欧拉模型概述及其局限	157
5.3.2	控制方程	158
5.4	气穴影响	170
5.4.1	气穴模型概述及其局限	170
5.4.2	体积和气泡数量	171
5.4.3	体积分数方程	171
5.4.4	气泡动力学	171
5.5	选择通用多相流模型	172
5.6	设置一般的多相流问题	172
5.6.1	使用一般多相流模型的步骤	172
5.6.2	选用多相流模型并指定相数	173
5.6.3	VOF 模型设置	173
5.6.4	Mixture 模型设置	175
5.6.5	Eulerian 模型设置	175
5.6.6	包含气穴影响	175
5.6.7	定义相概述	176
5.6.8	定义 VOF 模型中的相	177
5.6.9	定义混合模型中的相	179
5.6.10	定义欧拉模型中的相	180

5.6.11	包含体积力的设置	183
5.6.12	VOF 模型中时间依赖参数的设置	183
5.6.13	欧拉多相流计算中的湍流模型选择	184
5.6.14	设置边界条件	185
5.6.15	设置初始体积分	190
5.6.16	可压缩 VOF 和 Mixture 模型计算的输入	190
5.6.17	凝固/熔化 VOF 计算的输入	190
5.7	一般多相流问题的求解策略	191
5.7.1	VOF 模型的求解策略	191
5.7.2	混合模型的求解策略	192
5.7.3	欧拉模型的求解策略	192
第 6 章	多相流计算实例	193
6.1	U 型管油水环状流的计算	193
6.1.1	问题描述	193
6.1.2	具体计算	193
6.2	沉淀池活性污泥沉降的计算	204
6.2.1	问题描述	204
6.2.2	具体计算	205
6.3	泄洪坝气固液三相流的计算	215
6.3.1	问题描述	215
6.3.2	具体计算	216
6.4	泄洪坝气液两相流的计算	223
6.4.1	问题描述	223
6.4.2	具体计算	224
第 7 章	动网格计算方法概述	230
7.1	动网格计算模型	230
7.2	动网格更新方法	231
7.2.1	基于弹性变形的网格调整	231
7.2.2	动态网格层变	232
7.2.3	局部网格重构	232
7.3	Fluent 中动网格相关设置	234
7.3.1	启动动网格计算	234
7.3.2	运动边界文件的准备与导入	236
7.3.3	运动边界(动态区域)的相关设置	237
第 8 章	UDF 使用指南	242
8.1	UDF 基础	242

8.1.1	Fluent 的求解次序	242
8.1.2	Fluent 网格拓扑	243
8.1.3	Fluent 的数据类型	243
8.2	UDF 中访问 Fluent 变量的宏	243
8.2.1	访问单元的宏	243
8.2.2	访问面的宏	246
8.2.3	访问几何的宏	247
8.2.4	访问节点的宏	248
8.2.5	访问多相的宏	248
8.3	UDF 实用工具宏	249
8.3.1	一般的循环宏	249
8.3.2	查询多相组分的宏	251
8.3.3	设置面变量	254
8.3.4	访问没有赋值的自变量	254
8.3.5	访问邻近网格和线索的变量	259
8.3.6	矢量工具	259
8.4	UDF 常用 DEFINE 宏	261
8.4.1	通用求解宏	261
8.4.2	模型指定宏	262
8.4.3	多相流模型宏	265
8.5	UDF 的解释和编译	267
8.5.1	UDF 的解释运行	268
8.5.2	UDF 的编译	269
8.5.3	UDF 的 VC++ 编译	271
8.5.4	编译相关问题	275
第 9 章	动网格计算实例	276
9.1	塑料圆柱体自空气跌落水中的模拟	276
9.1.1	问题描述	276
9.1.2	具体计算	276
9.2	齿轮泵的动态模拟	285
9.2.1	问题描述	285
9.2.2	具体计算	286
9.3	悬浮生物载体在移动床运动的模拟	292
9.3.1	问题描述	292
9.3.2	具体计算	293
第 10 章	滑移网格基础	301
10.1	滑移网格概述	301

10.1.1	滑移网格应用及运动方式	301
10.1.2	滑移网格原理	303
10.2	滑移网格基本设置	304
10.2.1	网格的前提条件	304
10.2.2	问题的建立	305
第 11 章	滑移网格的计算实例	307
11.1	转笼生物反应器的内部流场计算	307
11.1.1	问题描述	307
11.1.2	具体计算	309
11.2	车辆交会的动态模拟	317
11.2.1	问题描述	317
11.2.2	具体计算	317
11.3	滑移网格模型和动网格模型计算比较	324
11.3.1	数学模型上的区别	324
11.3.2	建模处理的区别	324
11.3.3	计算速度的比较	325
11.3.4	转笼生物反应器计算结果上的区别	326
11.3.5	结论	326
第 12 章	UDF 的高级用法	330
12.1	求取任意几何点的物理场值	330
12.1.1	基本 C++ 类的说明	330
12.1.2	求取任何一点的物理场值的方法	332
12.2	Fluent 和有限元软件的数据交换	334
12.2.1	两数值模拟软件进行数据交换的方式条件	334
12.2.2	Fluent 和 FEPG 的数据交换	335
第 13 章	开发基于 ICEM 与 Fluent 的定制数值模拟软件	336
13.1	用 VC++ 操纵 ICEM	336
13.1.1	脚本文件 .rpl 的构建	336
13.1.2	ICEM 的启动和脚本文件的运行	338
13.1.3	ICEM 的进阶编程初步	339
13.2	用 VC 操纵 Fluent	342
13.2.1	Fluent 的命令行操纵方法	342
13.2.2	用 VC 操纵 Fluent	343
13.3	边界条件的自动识别和施加	347
13.4	用 VC 操纵 Tecplot	348

第 14 章 流固耦合及其实例分析	350
14.1 ANSYS 流固耦合分析	350
14.1.1 理论基础	350
14.1.2 单向流固耦合分析	352
14.1.3 双向流固耦合分析	352
14.1.4 耦合面的数据传递	353
14.2 流固耦合基本设置	354
14.2.1 单向耦合基本设置	354
14.2.2 双向耦合基本设置	354
14.3 河水冲击闸板的分析实例	355
14.3.1 问题描述	355
14.3.2 具体计算	356
14.4 主动脉血管瘤的分析实例	369
14.4.1 问题描述	369
14.4.2 具体计算	369
第 15 章 多孔介质及其实例分析	382
15.1 多孔介质及其模型的概述	382
15.1.1 多孔介质应用	382
15.1.2 多孔介质模型的假设和限制条件	383
15.1.3 多孔介质的动量方程	383
15.1.4 多孔介质能量方程处理	384
15.1.5 多孔介质模型对湍流的处理	385
15.1.6 多孔介质对瞬态标量方程的影响	385
15.1.7 多孔介质计算中用户的输入参数	385
15.1.8 多孔介质流动的求解策略	388
15.2 变截面纤维结构中树脂流动的分析实例	389
15.2.1 问题描述	389
15.2.2 具体计算	389
15.3 废气过滤数值分析实例	397
15.3.1 问题描述	397
15.3.2 具体计算	398
第 16 章 Fluent 拓展应用实例	405
16.1 蛇形管内水沸腾流动模拟	405
16.1.1 问题描述	405
16.1.2 具体计算	406
16.2 水雾射流撞击打磨工件的模拟	415

16.2.1	问题描述	415
16.2.2	具体计算	415
16.3	液滴撞击液膜的数值模拟	422
16.3.1	问题描述	422
16.3.2	具体计算	422
16.4	微流体流动的模拟	431
16.4.1	问题描述	431
16.4.2	具体计算	431

参考文献	440
------	-----

第1章

CFD 基础

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是流体力学的一个分支,它通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关信息,实现了用计算机代替试验装置完成“计算试验”,为工程技术人员提供了实际工况模拟仿真的操作平台,已广泛应用于航空航天、热动力、土木水利、汽车工程、铁道、船舶工业、化学工程、流体机械、环境工程等领域。

本章介绍 CFD 一些重要的基础知识,帮助读者熟悉 CFD 的基本理论和基本概念,为计算时设置计算参数、边界条件、计算结果的分析与整理提供参考。

1.1 流体力学的基本概念

1.1.1 流体的连续介质模型

(1) 流体质点(fluid particle): 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。

(2) 连续介质(continuum/continuous medium): 质点连续地充满所占空间的流体或固体。

(3) 连续介质模型(continuum continuous medium model): 把流体视为没有间隙地充满它所占据的整个空间的一种连续介质,且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型: $u = u(t, x, y, z)$ 。

1.1.2 流体的性质

1. 惯性

流场中流体惯性(inertia)为流体不受外力作用时,保持其原有运动状态的属性。惯性与质量有关,质量越大,惯性就越大。单位体积流体的质量称为密度(density),以 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。对于均质流体,设其体积为 V ,质量为 m ,则密度为

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

对于非均质流体,密度随点而异。若取包含某点在内的体积为 ΔV ,其中质量为 Δm ,则该点密度用极限方式表示,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

2. 压缩性

压缩性(compressibility)为作用在流体上的压力变化可引起流体的体积变化或密度变化,这一现象称为流体的可压缩性。压缩性可用体积压缩率 k 来量度。

$$k = -\frac{dV/V}{dp} = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-3)$$

式中, p 为外部压强。

在研究流体流动过程中,若考虑到流体的压缩性,则称为可压缩流动,该流体称为可压缩流体,如高速流动的气体。若不考虑流体的压缩性,则称为不可压缩流动,此流体称为不可压缩流体,如水、油等。

3. 黏性

黏性(viscosity)为在运动的状态下,流体所产生的抵抗剪切变形的性质。黏性大小由黏度来量度。流体的黏度是由流动流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。黏度有动力黏度 μ 和运动黏度 ν 之分。动力黏度由牛顿内摩擦定律导出。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中, τ 为切应力,Pa; μ 为动力黏度,Pa·s; du/dy 为流体的剪切变形速率。

运动黏度与动力黏度的关系为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

式中, ν 为运动黏度, m^2/s 。

在研究流体流动过程中,考虑流体的黏性时,称为黏性流动,相应的流体称为黏性流体;当不考虑流体的黏性时,称为理想流体的流动,相应的流体称为理想流体。

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律,将流体分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体严格满足牛顿内摩擦定律且 μ 保持为常数。非牛顿流体的切应力与速度梯度不成正比,一般又分为塑性流体,假塑性流体,胀塑性流体三种。

塑性流体,如牙膏等,它们有一个保持不产生剪切变形的初始应力 τ_0 ,只有克服了这个初始应力后,其切应力才与速度梯度成正比,即

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

假塑性流体,如泥浆等。其切应力与速度梯度的关系是

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1-7)$$

胀塑性流体,如乳化液等,其切应力与速度梯度的关系是

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n > 1) \quad (1-8)$$

1.1.3 流体力学中的力与压强

1. 质量力

与流体微团质量大小有关并且集中在微团质量中心的力称为质量力(body force)。在重力场中有重力 mg ；直线运动时,有惯性力 ma 。质量力是一个矢量,一般用单位质量所具有的质量力来表示,其形式如下

$$\mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k} \quad (1-9)$$

式中, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为单位质量力在轴上的投影。

2. 表面力

大小与表面面积有关而且分布作用在流体表面上的力称为表面力(surface force)。表面力按其作用方向可以分为两种:一是沿表面内法线方向的压力,称为正压力;另一种是沿表面切向的摩擦力,称为切向力。

对于理想流体的流动,流体质点只受到正压力,没有切向力。对于黏性流体流动,流体质点所受到的作用力既有正压力,也有切向力。

作用在静止流体上的表面力只有沿表面内法线方向的正压力。单位面积上所受到的表面力称为这一点处的静压强。静压强具有两个特征:①静压强的方向垂直指向作用面;②流场内一点处静压强的大小与方向无关。

3. 表面张力

在液体表面,界面上液体间的相互作用力为张力,在液体表面有自动收缩的趋势,收缩的液面存在与该处液面相切的拉力,称为液体的表面张力(surface tension)。正是这种力的存在,引起弯曲液面内外出现压强差以及常见的毛细现象等。

试验表明,表面张力大小与液面的截线长度 L 成正比,即

$$T = \sigma L \quad (1-10)$$

式中, σ 为表面张力系数,它表示液面上单位长度截线上的表面张力,其大小由液体性质与接触相温度、压力等决定,其单位为 N/m 。

4. 绝对压强、相对压强及真空度

标准大气压的压强是 101325Pa (760mm 汞柱),是压强的单位,记作 atm 。若压强大于大气压,则以此压强为计算基准得到的压强称为相对压强(relative pressure),也称表压强,通常用 p_r 表示。若压强小于大气压,则压强低于大气压的值就称为真空度(vacuum),通常用 p_v 表示。如以压强 0Pa 为计算的基准,则这个压强就称为绝对压强(absolute pressure),通常用 p_s 表示。这三者的关系如下

$$p_r = p_s - p_{\text{atm}} \quad (1-11)$$

$$p_v = p_{\text{atm}} - p_s \quad (1-12)$$

在流体力学中,压强都用符号 p 表示,但一般来说有一个约定,对于液体,压强用相对

压强；对于气体，特别是马赫数大于 0.1 的流动，应视为可压缩流，压强用绝对压强。

压强的单位较多，一般用 Pa，也可用单位 bar，还可以用汞柱、水柱，这些单位换算如下

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 101325\text{Pa}$$

5. 静压、动压和总压

对于静止状态下的流体，只有静压强。对于流动状态的流体，有静压强(static pressure)、动压强(dynamic pressure)、测压管压强(manometric tube pressure)和总压强(total pressure)之分，从伯努利(Bernoulli)方程中分析它们的意义。

伯努利方程阐述一条流线上流体质点的机械能守恒。对于理想流体的不可压缩流动其表达式如下

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1-13)$$

式中， $p/\rho g$ 称为压强水头，也是压能项，为静压强； $v^2/2g$ 称为速度水头，也是动能项； z 称为位置水头，也是重力势能项；这三项之和就是流体质点的总的机械能； H 称为总的水头高。

将式(1-13)两边同时乘以 ρg ，则有

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-14)$$

式中， p 称为静压强，简称静压； $\frac{1}{2}\rho v^2$ 称为动压强，简称动压； $\rho g H$ 称为总压强，简称总压。对于不考虑重力的流动，总压就是静压和动压之和。

1.1.4 流体运动的描述

1. 流体运动描述的方法

描述流体物理量有两种方法，一种是拉格朗日描述，一种是欧拉描述。

拉格朗日(Lagrange)描述也称随体描述，它着眼于流体质点，并将流体质点的物理量认为是随流体质点及时间变化的，即把流体质点的物理量表示为拉格朗日坐标及时间的函数。设拉格朗日坐标为 (a, b, c) ，以此坐标表示的流体质点的物理量，如矢径、速度、压强等在任一时刻 t 的值，便可以写为 a, b, c 及 t 的函数。

若以 f 表示流体质点的某一物理量，其拉格朗日描述的数学表达是

$$f = f(a, b, c, t) \quad (1-15)$$

例如，设时刻 t 流体质点的矢径(即 t 时刻流体质点的位置)以 r 表示，其拉格朗日描述为

$$r = r(a, b, c, t) \quad (1-16)$$

同样，质点的速度的拉格朗日描述是

$$v = v(a, b, c, t) \quad (1-17)$$

欧拉描述，也称空间描述，它着眼于空间点，认为流体的物理量随空间点及时间而变化，

即把流体物理量表示为欧拉坐标及时间的函数。设欧拉坐标为 (q_1, q_2, q_3) (欧拉坐标可以用直角坐标 (x, y, z) , 柱坐标 (r, θ, z) 或球坐标 (r, θ, φ) 来表示), 用欧拉坐标表示的各空间点上的流体物理量如速度、压强等, 在任一时刻 t 的值, 可写为 q_1, q_2, q_3 及 t 的函数。从数学分析知道, 当某时刻一个物理量在空间的分布一旦确定, 该物理量在此空间形成一个场。因此, 欧拉描述实际上描述了一个个物理量的场。

若以 f 表示流体的一个物理量, 其欧拉描述的数学表达是(设空间坐标取用直角坐标)

$$f = F(x, y, z, t) = F(r, t) \quad (1-18)$$

如流体速度的欧拉描述是

$$v = v(x, y, z, t) \quad (1-19)$$

2. 拉格朗日描述与欧拉描述之间的关系

拉格朗日描述着眼于流体质点, 将物理量视为随体坐标与时间的函数; 欧拉描述着眼于空间点, 将物理量视为空间坐标与时间的函数。它们可以描述同一物理量, 必定互相关。设表达式 $f = f(a, b, c, t)$ 表示流体质点 (a, b, c) 在 t 时刻的物理量; 表达式 $f = F(x, y, z, t)$ 表示空间点 (x, y, z) 上于时刻 t 的同一物理量。如果流体质点 (a, b, c) 在 t 时刻恰好运动到空间点 (x, y, z) 上, 则应有

$$\begin{cases} x = x(a, b, c, t) \\ y = y(a, b, c, t) \\ z = z(a, b, c, t) \end{cases} \quad (1-20)$$

$$F(x, y, z, t) = f(a, b, c, t) \quad (1-21)$$

事实上, 将式(1-20)代入式(1-21)左端, 即有

$$\begin{aligned} F(x, y, z, t) &= F[x(a, b, c, t), y(a, b, c, t), z(a, b, c, t), t] \\ &= f(a, b, c, t) \end{aligned} \quad (1-22)$$

或者反解式(1-20), 得到

$$\begin{cases} a = a(x, y, z, t) \\ b = b(x, y, z, t) \\ c = c(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1-23)$$

将式(1-23)代入式(1-21)的右端, 也应有

$$\begin{aligned} f(a, b, c, t) &= f[a(x, y, z, t), b(x, y, z, t), c(x, y, z, t), t] \\ &= F(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1-24)$$

由此, 可以通过拉格朗日描述推出欧拉描述, 同样也可以由欧拉描述推出拉格朗日描述。

3. 随体导数

流体质点物理量随时间的变化率称为随体导数(substantial derivative), 或物质导数、质点导数。

按拉格朗日描述, 物理量 f 表示为 $f = f(a, b, c, t)$, f 的随体导数就是跟随质点 (a, b, c) 的物理量 f 对时间 t 的导数 $\partial f / \partial t$ 。例如: 速度 $v(a, b, c, t)$ 是矢径 $r(a, b, c, t)$ 对时间的偏导数