

| 知名专家 敬加强、赵振兴、熊友明、刘平礼、张杰 | 倾力推荐 |

ANSYS 14.5

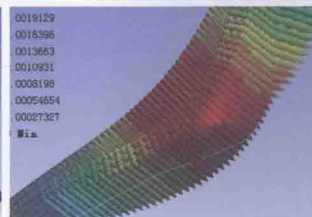
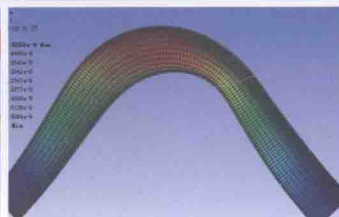
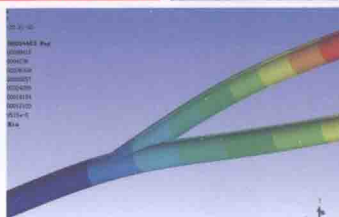
热流固耦合

实战指南

朱红钧 / 编著



DVD 教学视频



- ◆ 耦合分析基础
- ◆ FLUENT 动网格基础
- ◆ 基于动网格铺层法的耦合分析
- ◆ 基于动网格弹性光顺法的耦合分析
- ◆ 基于动网格局部重构法的耦合分析
- ◆ T 型管稳态热固耦合计算
- ◆ 玻璃奶瓶的热固耦合计算
- ◆ 风吹树摆的流固耦合计算
- ◆ 测速毕托管的流固耦合计算
- ◆ 水流冲击桥墩的流固耦合计算
- ◆ 射流冲击平板的流固耦合计算
- ◆ 输油弯管的流固耦合计算
- ◆ 针形阀的流固耦合计算
- ◆ 盲通管的流固耦合计算
- ◆ 血管的流固耦合计算
- ◆ 换热管的热流固耦合计算
- ◆ 海底管道的双向流固耦合计算

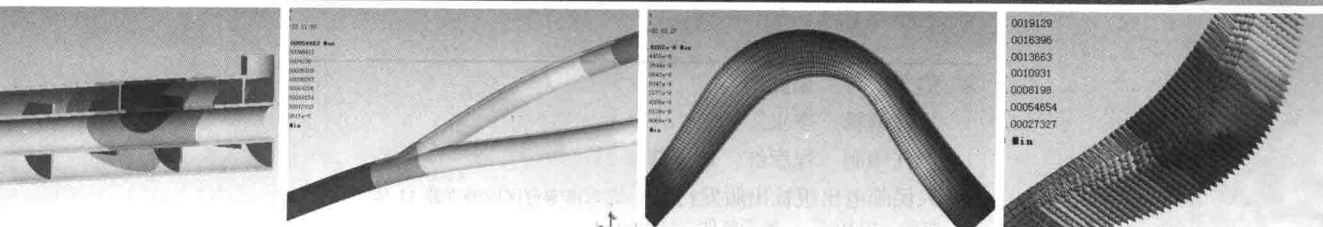
 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

ANSYS 14.5

热流固耦合

实战指南

朱红钧 / 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 14.5热流固耦合实战指南 / 朱红钧编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2014.4
ISBN 978-7-115-34586-8

I. ①A… II. ①朱… III. ①热流—耦合—有限元分
析—应用软件—指南 IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第036298号

内 容 提 要

热流固耦合问题普遍存在于工程实际中,涉及核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输、造船、水利等领域。过去仿真技术水平不高,大多数模拟局限于流场分析或固体分析,没有很好地将两方面耦合起来,与实际存在一定的差距。现如今,仿真技术高速发展,使得多场耦合得以实现,已成为了解决工程问题的新利器。ANSYS 是目前开展多场耦合分析相对成熟的软件,其 Workbench 平台界面友好,功能全面。本书以 ANSYS 14.5 为蓝本,基于 ANSYS 的 Workbench 平台,利用 Workbench 中的 Static Structure、FLUENT 及 Steady Thermal 来实现流固、热固、热流固的单向以及双向耦合,列举了解决实际工程中所遇问题的思路及过程。全书以“功能讲解+思路分析+应用过程+视频讲解”的方式,通过大量实例全面介绍流固、热固、热流固耦合在工程中的应用。

本书可作为土木、建筑、水利、石油、储运、机械、自动化、过程装备等领域研究人员、教师、研究生和高年级本/专科生的学习指南,也可作为 ANSYS 14.5 自学者学习热流固耦合仿真技术的教学参考书,还可作为高等教育、培训机构开展耦合数值仿真教育的培训教材。

◆ 编 著 朱红钧
责任编辑 李永涛
责任印制 程彦红 焦志炜

◆ 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>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 23.75

字数: 576千字

印数: 1-3000册

2014年4月第1版

2014年4月北京第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

关于本书

热流固耦合理论是一个涉及范围非常广泛的学科，它涉及渗流力学、固体力学、岩石力学、热力学、传热学、构造地质学、地球物理学、地下工程等学科，并且是将这些学科的知识交叉、综合运用。因此热流固耦合问题在广泛存在于如地面沉降、水库诱发地震、堤坝稳定性、煤层瓦斯渗流、石油工业注采过程中的油藏渗流、地层失稳坍塌、液体晃荡对火箭的飞行影响、航空发动机散热等工程中。为了更好地反映工程实际，耦合分析已经成为工程应用领域的新宠，也是必然的发展需求。ANSYS 的 Workbench 平台，集成了 Static Structure（结构静力学）/Transient Structure（结构瞬态力学）、FLUENT/CFX 以及 Steady Thermal（稳态热分析）/Transient Thermal（瞬态热分析）等模块，可以开展流固、热固、热流固的单向以及双向耦合，功能全面，界面友好，拥有广大的用户群。

内容和特点

本书以 ANSYS 14.5 为蓝本，介绍基于 Workbench 平台，利用多个模块开展热固、流固、热流固和双向耦合的分析方法与操作流程。全书以“功能讲解+问题剖析+应用过程+视频讲解”的方式，通过大量实例全面介绍流固、热固、热流固耦合在工程中的应用。读者可按照书中的步骤一步一步进行操作，可在短时间内掌握软件相应操作，进而实现实际工程问题的解决。

全书分为 17 章，主要内容介绍如下。

- 第 1 章：讲解耦合分析的基础理论以及 ANSYS 实现耦合分析的操作与流程。
- 第 2 章：主要讲解 FLUENT 动网格基础理论和参数设置。
- 第 3 章：主要讲解基于动网格铺层法的耦合分析实例和操作方法。
- 第 4 章：主要讲解基于动网格弹性光顺法的耦合分析实例和操作方法。
- 第 5 章：主要讲解基于动网格局部重构法的耦合分析实例和操作方法。
- 第 6 章：主要讲解 T 型管稳态热固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 7 章：主要讲解玻璃奶瓶的热固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 8 章：主要讲解风吹树摆的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 9 章：主要讲解测速毕托管的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 10 章：主要讲解水流冲击桥墩的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 11 章：主要讲解射流冲击平板的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 12 章：主要讲解输油弯管的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。

- 第 13 章：主要讲解针形阀的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 14 章：主要讲解盲通管的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 15 章：主要讲解血管的流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 16 章：主要讲解换热管的热流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。
- 第 17 章：主要讲解海底管道的双向流固耦合计算建模、网格划分、耦合计算流程和操作方法。

本书在编写的过程中突出了以下特点。

- 全书以图解实例的形式介绍典型实例操作，直观易懂，使用户能够在最短的时间内获取知识。
- 全书采用了操作界面及功能介绍和实例操作相结合的方法，互相补充，书本上的实例大多来源于生产实例，并且从用户的角度出发进行了简化和改进，同时在各内容关键处给予了有益的提示和指导，使用户在学完本书后能够快速地将知识应用于生产实践。
- 全书采用“功能、实例、视频”循序渐进的讲解方法，一步步地提高用户的热流固耦合分析方法，而且每个知识点和实例都做了尽可能详细的讲解，使用户学习起来轻松自如。
- 书中提供了所有算例的源文件，可供读者直接调用和观摩。
- 全书将功能讲解、实例讲解等全部内容，按照上课教学的形式录制成多媒体视频，让读者如临教室，学习效果更好。




读者对象

全书实例多，内容丰富，分析全面，前处理软件不拘泥于一个，能够帮助读者尽快掌握耦合分析所涉及的相关软件的仿真计算方法与操作分析流程。

本书可作为土木、建筑、水利、石油、储运、机械、自动化、过程装备等领域研究人员、教师、研究生和高年级本/专科生的学习指南，也可作为 ANSYS 14.5 自学者学习热流固耦合仿真技术的教学参考书，还可作为高等教育、培训机构开展耦合数值仿真教育的培训教材。

附盘内容及用法

本书配套 1 张多媒体 DVD 光盘，主要内容和注意事项介绍如下。

1. START 文件夹用于存放操作实例的起始文件，对应文中的  按钮。END 文件夹用于存放操作实例的结果文件，对应文中的  按钮。AVI 文件夹用于存放所有操作实例的操作录像，对应文中的  按钮，直接双击需要播放的文件即可观看。

2. Ch*文件夹的*号代表某个数字，与本书的章对应，其中的文件是该章中使用到的相关文件，包括本书中所有操作实例的起始文件、结果文件和视频文件。
3. 本书是基于 ANSYS 14.5 版本进行写作的，读者需要用不低于上述版本的软件。
4. 由于光盘中的文件是只读文件，因此，需要将光盘上的源文件复制到电脑硬盘上，并取消文件的“只读”属性，导入后方能进行修改。

注意：播放文件前要安装配套光盘根目录下的“avi_tsc.exe”插件。

全书由西南石油大学朱红钧编著。另外，西南石油大学 CNPC “石油管工程”重点实验室的研究生韩青华、马粤、赵洪南、巴彬、冯光、戚兴、邹大鹏、杨晓露、张文丽参与了部分模拟操作和文档整理工作。本书还得到了人民邮电出版社的大力支持，在此一并致以深深的谢意！同时也非常感谢 SimWe 仿真科技论坛、工程流体网论坛、流体论坛广大网友的帮助和支持。

限于编者水平，且时间仓促，书中难免有疏漏之处，望广大读者给予指正。读者可通过电子邮件 swputicky@126.com 与编者交流，不胜感谢！

编者

2014年1月于成都

目 录

第 1 章 耦合分析基础	1
1.1 耦合基本方程	1
1.1.1 流体控制方程	2
1.1.2 固体控制方程	8
1.1.3 传热控制方程	8
1.1.4 耦合控制方程	8
1.2 ANSYS 热流固耦合的实现	8
1.2.1 操作界面	8
1.2.2 单向耦合	12
1.2.3 双向耦合	13
1.3 小结	14
第 2 章 FLUENT 动网格基础	15
2.1 动网格基础	15
2.1.1 动网格术语的定义	15
2.1.2 守恒型动网格流场计算方程	16
2.1.3 动网格模型的兼容性	16
2.2 体网格再生方法	18
2.2.1 铺层法简介	19
2.2.2 铺层法网格控制参数	20
2.2.3 弹性光顺法简介	20
2.2.4 弹性光顺法控制参数	21
2.2.5 局部重构法简介	22
2.2.6 局部重构法网格控制参数	24
2.2.7 动网格运动区域控制参数	24
2.3 小结	30
第 3 章 基于动网格铺层法的耦合分析实例	31
3.1 活塞运动模拟	31
3.1.1 案例简介与思路分析	31
3.1.2 几何建模	32
3.1.3 网格划分	33
3.1.4 FLUENT 中的求解设置	34
3.1.5 结果后处理与分析	39
3.2 传送带传热模拟	42
3.2.1 案例简介与思路分析	42

3.2.2	几何建模	43
3.2.3	网格划分	45
3.2.4	FLUENT 中的求解设置	48
3.2.5	结果后处理与分析	55
3.3	小结	59
第 4 章	基于动网格弹性光顺法的耦合分析实例	60
4.1	止回阀模拟	60
4.1.1	案例简介与思路分析	60
4.1.2	几何建模	61
4.1.3	网格划分	62
4.1.4	FLUENT 中的求解设置	64
4.1.5	结果后处理与分析	71
4.2	活塞运动模拟	74
4.2.1	案例简介与思路分析	74
4.2.2	几何建模	75
4.2.3	网格划分	76
4.2.4	FLUENT 中的求解设置	77
4.2.5	结果后处理与分析	84
4.3	小结	86
第 5 章	基于动网格局部重构法的耦合分析实例	87
5.1	子弹入水过程模拟	87
5.1.1	案例简介与思路分析	87
5.1.2	几何建模	89
5.1.3	网格划分	91
5.1.4	FLUENT 中的求解设置	93
5.1.5	结果后处理与分析	101
5.2	齿轮泵内流场模拟	103
5.2.1	案例简介与思路分析	103
5.2.2	几何建模	104
5.2.3	网格划分	105
5.2.4	FLUENT 中的求解设置	106
5.2.5	结果后处理与分析	113
5.3	子弹弹膛内运动模拟	115
5.3.1	案例简介与思路分析	115
5.3.2	几何建模	116
5.3.3	网格划分	119
5.3.4	FLUENT 中的求解设置	121

5.3.5 结果后处理与分析	127
5.4 偏心旋转钻杆周围流场模拟	131
5.4.1 案例简介与思路分析	131
5.4.2 几何建模	132
5.4.3 网格划分	134
5.4.4 FLUENT 中的求解设置	136
5.4.5 结果后处理与分析	143
5.5 小结	147
第 6 章 T 型管稳态热固耦合计算	148
6.1 案例简介与思路分析	148
6.2 几何建模	149
6.3 流场网格划分	156
6.4 FLUENT 中的求解设置	158
6.5 流场分析后处理	164
6.6 结构网格划分	165
6.7 结构加载与求解	166
6.8 结构分析后处理	168
6.9 小结	168
第 7 章 玻璃奶瓶的热固耦合计算	169
7.1 案例简介与思路分析	169
7.2 几何建模	170
7.3 网格划分	175
7.4 FLUENT 中的求解设置	177
7.5 结果分析	183
7.6 小结	184
第 8 章 风吹树摆的流固耦合计算	185
8.1 案例简介与思路分析	185
8.2 几何建模	186
8.3 流场网格划分	190
8.4 FLUENT 中的求解设置	192
8.5 流场分析后处理	194
8.6 结构网格划分	197
8.7 结构加载与求解	198
8.8 结构分析后处理	200
8.9 小结	200

第 9 章 测速毕托管的流固耦合计算	201
9.1 案例简介与思路分析	201
9.2 几何建模	202
9.3 流场网格划分	206
9.4 FLUENT 中的求解设置	207
9.5 流场分析后处理	211
9.6 结构网格划分	213
9.7 结构加载与求解	214
9.8 结构分析后处理	216
9.9 小结	216
第 10 章 水流冲击桥墩的流固耦合计算	217
10.1 案例简介与思路分析	217
10.2 几何建模	218
10.3 流场网格划分	222
10.4 FLUENT 中的求解设置	223
10.5 流场分析后处理	228
10.6 结构网格划分	230
10.7 结构加载与求解	231
10.8 结构分析后处理	233
10.9 小结	233
第 11 章 射流冲击平板的流固耦合计算	234
11.1 案例简介与思路分析	234
11.2 几何建模	235
11.3 流场网格划分	239
11.4 FLUENT 中的求解设置	240
11.5 流场分析后处理	244
11.6 结构网格划分	246
11.7 一端固定时结构加载与求解	247
11.8 一端固定时结构分析后处理	249
11.9 两端固定时结构加载与求解	250
11.10 两端固定时结构分析后处理	251
11.11 小结	252
第 12 章 输油弯管的流固耦合计算	253
12.1 案例简介与思路分析	253
12.2 几何建模	254
12.3 流场网格划分	260

12.4	FLUENT 中的求解设置	261
12.5	流场分析后处理	264
12.6	结构网格划分	265
12.7	结构加载与求解	266
12.8	结构分析后处理	268
12.9	小结	268
第 13 章	针形阀的流固耦合计算	269
13.1	案例简介与思路分析	269
13.2	几何建模	270
13.3	流场网格划分	278
13.4	FLUENT 中的求解设置	279
13.5	流场结果分析	283
13.6	结构网格划分	284
13.7	结构加载与求解	284
13.8	结果后处理与分析	286
13.9	小结	287
第 14 章	盲通管的流固耦合计算	288
14.1	案例简介与思路分析	288
14.2	几何建模	289
14.3	流场网格划分	295
14.4	FLUENT 中的求解设置	296
14.5	流场分析后处理	299
14.6	结构网格划分	300
14.7	结构加载与求解	301
14.8	结构分析后处理	302
14.9	小结	302
第 15 章	血管的流固耦合计算	303
15.1	案例简介与思路分析	303
15.2	几何建模	304
15.3	流场网格划分	307
15.4	FLUENT 中的求解设置	309
15.5	流场分析后处理	312
15.6	结构网格划分	314
15.7	结构加载与求解	315
15.8	结构分析后处理	317
15.9	小结	317

第 16 章 换热管的热流固耦合计算	318
16.1 案例简介与思路分析.....	318
16.2 几何建模.....	320
16.3 流场网格划分.....	326
16.4 FLUENT 中的求解设置.....	329
16.5 流场结果分析.....	334
16.6 热分析结构网格划分.....	335
16.7 热边界加载与求解.....	337
16.8 热分析后处理.....	338
16.9 应力分析结构网格划分.....	338
16.10 应力加载与求解.....	339
16.11 应力分析后处理.....	341
16.12 小结.....	341
第 17 章 海底管道的双向流固耦合计算	342
17.1 案例简介与思路分析.....	342
17.2 几何建模.....	343
17.3 流场网格划分.....	351
17.4 FLUENT 中的求解设置.....	352
17.5 结构网格划分.....	357
17.6 结构加载与设置.....	359
17.7 流固耦合解算设置.....	360
17.8 结果分析与后处理.....	361
17.9 小结.....	365
参考文献	366

第 1 章

耦合分析基础

在科学研究和工程分析过程中，各种物理现象都存在着相互关联的作用，纯粹的单场问题并不存在。但是，考虑多个物理场进行耦合分析比单独分析一个物理场要复杂得多。CAE 技术因受限于计算机硬件，往往将多物理场问题进行简化处理。热流固耦合即是多场耦合分析中最常见、最普遍的耦合问题。热流固耦合力学是热力学与传热学、流体力学与固体力学交叉而生成的一门力学分支，它包括热固耦合的传热问题、流固耦合的变形运动问题以及热流固三场耦合问题。它是研究流动流体与固体之间传热效果，变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位形对流场影响的相互作用的一门科学。热流固耦合力学的重要特征是两相介质之间的相互作用，变形固体在流体载荷作用下会产生变形或运动，变形或运动又反过来影响流体载荷，从而改变流体载荷的分布和大小，正是这种相互作用将在不同条件下产生形形色色的热流固耦合现象。

ANSYS Workbench 集成了 Mechanical、FLUENT、CFX 等结构和流体分析软件，并能实现两两之间的数据传递，从而为热流固耦合分析提供了可实现的平台。ANSYS 的不断完善与更新，使得其不仅作为一种研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。本章主要介绍利用 ANSYS 开展热流固耦合分析的基础知识，使读者了解解算的基本方程及实现耦合分析的基本操作。



本章内容

- 流体控制方程
- 固体控制方程
- 传热控制方程
- 耦合控制方程
- 热流固耦合操作界面
- 单向耦合分析概述
- 双向耦合分析概述

1.1 耦合基本方程

热流固耦合问题需要求解的耦合方程的定义域同时有流体域与固体域，而未知变量含

有描述流体现象的变量和含有描述固体现象的变量，流体域与固体域均不可单独地求解，也无法显式地消去描述流体运动的独立变量及描述固体现象的独立变量。

总的来说，流固耦合问题按其耦合机理可分为两大类。

第一类问题的特征是耦合作用仅仅发生在两相交界面上，在方程上的耦合是由两相耦合面上的平衡及协调来引入的，如气动弹性、水动弹性等。

第二类问题的特征是两域部分或全部重叠在一起，难以明显地分开，使描述物理现象的方程，特别是本构方程需要针对具体的物理现象来建立，其耦合效应通过描述问题的微分方程来体现。

实际上热流固耦合问题是场（温度场、流场与固体变形场）间的相互作用：场间不相互重叠与渗透，其耦合作用通过界面力（包括多相流的相间作用力等）起作用；若场间相互重叠与渗透，其耦合作用通过建立不同与单相介质的本构方程等微分方程来实现。

耦合问题求解时有两种方式，一是两场交叉迭代（基于单向耦合），二是直接全部同时求解（基于双向耦合）。热流固耦合的数值计算问题，早期是从航空领域的气动弹性问题开始的，这也就是通过界面耦合的情况，只要满足耦合界面力平衡、界面相容就可以。气动弹性开始主要是考虑机翼的颤振边界问题，计算采用简化的气动方程和结构动力学方程，从理论推导入手，建立耦合方程，这种方法求解相对容易、适应性也较窄。

现在由于数值计算方法、计算机技术的发展，整个的求解趋向于综合求解纳维—斯托克斯方程（N-S 方程）与非线性结构动力学方程。一般使用迭代求解，也就是在流场、结构上分别求解，在各个时间步之间耦合迭代，收敛后再向前推进。好处就是各自领域内成熟的代码稍作修改就可以应用。其中，可能还要涉及一个动网格的问题，由于结构的变形使得流场的计算域发生变化，要考虑流场网格随时间变形以适应耦合界面的变形。

1.1.1 流体控制方程

流体流动要遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒等物理守恒定律。下面详细介绍这些基本守恒定律对应的控制方程。

一、连续性方程

连续性方程即质量守恒方程，任何流动问题都必须满足质量守恒定律。由单位时间内流出控制体的流体净质量等于同时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量，连续性方程的微分形式为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-1)$$

式中： u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量，m/s； t 为时间，s； ρ 为密度， kg/m^3 。

引入哈密顿微分算子：

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (1-2)$$

则式 (1-1) 可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1-3)$$

对于圆柱坐标系, 连续性方程形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho u_r}{r} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_\theta)}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-4)$$

式 (1-1) 给出的是通用的一般形式的连续性方程。若对于恒定流, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 其形式变为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-5)$$

若为不可压缩流动, 则有:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-6)$$

其柱坐标系形式为:

$$\frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-7)$$

二、动量方程

动量方程的本质是满足牛顿第二定律, 即对于一给定的流体微元, 其动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。依据这一定律, 可导出 x 、 y 、 z 三个方向的动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (1-8)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (1-9)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (1-10)$$

式中: p 为流体微元体上的压强, Pa; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量, Pa; f_x 、 f_y 、 f_z 为三个方向的质量力, m/s^2 , 若质量力只受重力, 且 z 轴垂直向上, 则 $f_x=f_y=0$, $f_z=-g$ 。

由广义内摩擦定律:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \quad (1-11)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \quad (1-12)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \quad (1-13)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (1-14)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (1-15)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (1-16)$$

式中: μ 为动力黏度, Pa·s; λ 为第二黏度, Pa·s, 通常取为 $-2/3$ 。

则式 (1-8) ~ 式 (1-10) 化为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \text{grad} u_x) + S_{u_x} \quad (1-17)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \text{grad} u_y) + S_{u_y} \quad (1-18)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \text{grad} u_z) + S_{u_z} \quad (1-19)$$

式中: S_{u_x} 、 S_{u_y} 、 S_{u_z} 为广义源项, $S_{u_x} = \rho f_x + s_x$, $S_{u_y} = \rho f_y + s_y$, $S_{u_z} = \rho f_z + s_z$, 其

中 s_x 、 s_y 、 s_z 为:

$$s_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) \quad (1-20)$$

$$s_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) \quad (1-21)$$

$$s_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) \quad (1-22)$$

对于黏性为常数的不可压缩流体, s_x 、 s_y 、 s_z 通常取为 0。

三、能量方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律, 其本质是热力学第一定律。依据能量守恒定律, 微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流通量加上质量力与表面力对微元体所做的功, 可得其表达式为:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{u}) \right] + S_h \quad (1-23)$$

式中: E 为流体微团的总能, J/kg, 包含内能、动能和势能之和, $E = h - p/\rho + u^2/2$; h 为焓, J/kg; h_j 为组分 j 的焓, J/kg; k_{eff} 为有效热传导系数, W/(m·K), $k_{eff} = k + k_t$, k_t 为湍流热传导系数, 根据所用的湍流模型来确定; J_j 为组分 j 的扩散通量; S_h 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

注意: 尽管能量方程是流动、传热问题的基本方程, 但对于不可压缩流动, 若热交换很小可以忽略时, 可不考虑能量方程。

四、气体动力学方程

流体包括气体, 而气体具有明显的可压缩性, 即在流动过程中其密度是变量, 需要充分考虑其压缩性对流动的影响, 气体动力学正是以可压缩气体流动规律为研究对象的。

理想气体符合状态方程 $p/\rho = RT$, 在常温常压下, 实际气体基本符合状态方程, 若考虑其压缩性, 状态方程可改写为 $p = Z\rho RT$, Z 为实际气体的压缩系数。

气体不同过程的状态参数变化情况不一。等温过程是指热力学系统在恒定温度下发生的各种物理或化学变化过程, 其 p/ρ 为常数。在整个等温过程中, 系统与其外界处于热平衡状态。如活塞推动气筒对恒温箱内气体缓慢压缩, 所做功等于流进容器内使气体温度保持不变的能。蓄电池在室温下缓慢充电和放电, 都可近似为等温过程。等压过程是热力学系统在发生物理或化学变化过程时, 其物质系统的压强始终保持恒定, ρRT 为常数。等压过程能量转化特点是系统吸收的热量等于系统内能的增量和系统对外所做功之和。如水蒸汽在锅炉加热器内受热的过程, 气缸中的气体在大气压下受热缓慢膨胀的过程等。定容过程是物质系统的体积保持不变的情况下所发生的各种物理或化学变化过程, 其 p/T 为常数。由于在等容过程中系统对外界不做功, 所以, 当系统的温度升高时, 将从外界吸收热量, 并全部转变为自身内能的增加。绝热过程是指系统与外界无热量交换时的状态变化过程, p/ρ^k 为常数。绝热过程分为可逆过程和不可逆过程(熵增不为零)两种。可逆(熵增为零)的绝热过程是等熵过程, 即系统与外界既没有热量交换, 也没有能量交换, 简称无能耗的绝热过程, 其 p/ρ^k 等于常数, k 为卡门系数, 对于空气而言, $k=1.4$ 。

气体运动最重要的两个物性参数是声速和马赫数。声速是指微弱压力扰动波在可压缩介