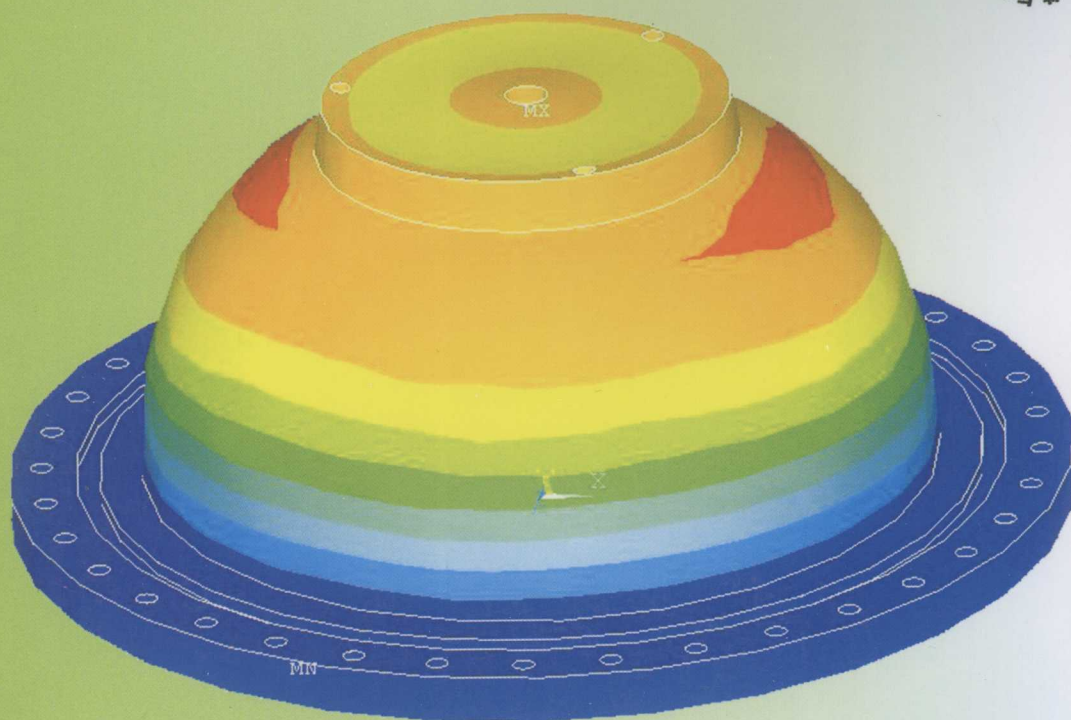


计算机辅助分析实例指导丛书



ANSYS 11.0/FLOTTRAN

流场分析

三维书屋工作室

实例指导教程

许洋 党沙沙 胡仁喜 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 11.0/FLOTRAN 流场分析实例指导教程

三维书屋工作室

许洋 党沙沙 胡仁喜 等编著

机械工业出版社

全书共 12 章。第 1 章全面介绍了 ANSYS/FLOTTRAN 的基本概念和分析类型,使读者对 ANSYS/FLOTTRAN 有初步的了解;第 2 章主要介绍了 ANSYS/FLOTTRAN 分析的基本原理,具体内容包括 FLOTTRAN 单元特点, FLOTTRAN 分析步骤, FLOTTRAN 分析工具,以及如何进行分析评价等;第 3 章介绍 FLOTTRAN 流体的基本属性,主要包括比热容,密度和导热系数、粘度、表面张力系数以及壁面静态接触角等;第 4 章介绍了 FLOTTRAN 特性,包括坐标系、旋转参考系、涡流和分布式阻力的设置方法以及 FLOTTRAN 命令的设置;第 5 章介绍了 LOTTRAN CFD 求解器和矩阵方程,主要包括三对角矩阵算法、半直接共轭方向法和高斯消去法 3 种算法;第 6 章介绍了层流和湍流不可压缩流动 FLOTTRAN 分析及实例;第 7 章介绍了 FLOTTRAN 热分析及实例;第 8 章介绍了 VOF 模型分析及实例;第 9 章介绍了可压缩流动 FLOTTRAN 分析及实例;第 10 章介绍了动网格的 ALE 分析及实例;第 11 章介绍了多组分传输分析及实例;第 12 章介绍了声学分析及实例。在各专题的讲解中介绍了相应的基本概念、理论以及利用 ANSYS 软件进行分析的基本过程,还介绍了相关的求解步骤。

本书适合于流体力学专业本科高年级或研究生作为自学教材,也可以作为流体力学研究人员和工程技术人员的参考学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 11.0/FLOTTRAN 流场分析实例指导教程/许洋等编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 111 - 25597 - 7

I. A… II. 许… III. 流场(流体力学)—分析—应用程序, ANSYS 11.0、FLOTTRAN—教材 IV. 035 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 187839 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 29.5 印张 · 729 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 25697 - 7

:ISBN 978 - 7 - 89482 - 888 - 0 (光盘)

定价:69.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68327259

封面无防伪标均为盗版

前 言

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件,由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发。它能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换,如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I—DEAS、AutoCAD 等,是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 软件可广泛地用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利和日用家电等一般工业及科学研究。ANSYS 软件的研究与开发不断汲取当今计算方法和计算机技术的最新发展,领导着有限元发展的趋势,并为全球工业界广泛接受,拥有全球最大的用户群。

目前,我国越来越多的专家和学者正在应用 ANSYS 进行各种问题的计算和分析,但相对缺乏的是 ANSYS/FLOTRAN 相关的学习和研究资料。出于此目的,结合自己的实际应用经验,编写了这本《ANSYS 11.0/FLOTRAN 流场分析实例指导教程》,希望能满足读者的需求。

FLOTRAN 是常规流体分析模块,基于有限元方法,涵盖层流/湍流、不可压缩流/可压缩流、牛顿流/非牛顿流等常规流体计算功能而开发。

全书共 12 章。第 1 章全面介绍了 ANSYS/FLOTRAN 的基本概念和分析类型,使读者对 ANSYS/FLOTRAN 有初步的了解;第 2 章主要介绍了 ANSYS/FLOTRAN 分析的基本原理,具体内容包括 FLOTRAN 单元特点, FLOTRAN 分析步骤, FLOTRAN 分析工具,以及如何进行分析评价等;第 3 章介绍 FLOTRAN 流体的基本属性,主要包括比热容,密度和导热系数、粘度、表面张力系数以及壁面静态接触角等;第 4 章介绍了 FLOTRAN 特性,包括坐标系、旋转参考系,涡流和分布式阻力的设置方法以及 FLOTRAN 命令的设置;第 5 章介绍了 LOTRAN CFD 求解器和矩阵方程,主要包括三对角矩阵算法、半直接共轭方向法和高斯消去法 3 种算法;第 6 章介绍了层流和湍流不可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例;第 7 章介绍了 FLOTRAN 热分析及实例;第 8 章介绍了 VOF 模型分析及实例;第 9 章介绍了可压缩流动 FLOTRAN 分析及实例;第 10 章介绍了动网格的 ALE 分析及实例;第 11 章介绍了多组分传输分析及实例;第 12 章介绍了声学分析及实例。在各专题的讲解中,我们都介绍了相应的基本概念、理论以及利用 ANSYS 软件进行分析的基本过程,还介绍了相关的求解步骤。

本书最大特点是围绕流体分析精选一系列实例,所有实例均以图解方式进行讲解,实例全面,分类讲解,使读者能够边学习边操练,更充分地享受阅读的乐趣和实用效果。

本书附有一张光盘,读者可以通过观看录像的方式,学习各类有限元分析问题的方法。相当于老师在旁边手把手地指导,可起到事半功倍的效果。

本书由三维书屋工作室策划,许洋、党沙沙和胡仁喜主要编写,在本书的编写过程中,得到了何韬、孙晓龙、张红松、王义发、刘昌丽、王玉秋、张俊生、王佩楷、周冰、王培合、张日晶、王渊峰、董伟、王兵学、李瑞、王敏、熊慧、王艳池、郑长松、王文平、李广荣、孟清华、路纯红、阳平华、张银彩、康士廷、袁涛、李鹏、周广芬、陈丽芹、李世强等的支持和鼓励,在此特向所有关心本书创作和出版的朋友表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,参考了一些有关文献,在此向这些文献的作者深表感谢。

由于我们的经验和水平有限,书中缺点和错误在所难免,诚恳希望读者登录 [www. b
j-sanweishuwu.com](http://www.bj-sanweishuwu.com) 或联系 win760520@126.com 批评指正。

作者

目 录

前言	1
第1章 FLOTTRAN 流体分析概述	1
1.1 FLOTTRAN CFD 分析的概念	1
1.2 FLOTTRAN 分析类型	1
1.2.1 层流分析	2
1.2.2 湍流分析	2
1.2.3 热分析	2
1.2.4 可压缩流动分析	3
1.2.5 非牛顿流动分析	3
1.2.6 多组份传输分析	3
1.2.7 自由表面分析	3
第2章 FLOTTRAN 分析的基本原理	4
2.1 FLOTTRAN 单元的特点	4
2.1.1 FLUID141 单元	4
2.1.2 FLUID142 单元	11
2.2 FLOTTRAN 单元的局限性	16
2.3 FLOTTRAN 分析步骤	17
2.3.1 确定问题的区域	18
2.3.2 确定流体的状态	18
2.3.3 生成有限元网络	18
2.3.4 施加边界条件	18
2.3.5 设置 FLOTTRAN 分析参数	19
2.3.6 求解	19
2.3.7 检查结果	19
2.4 FLOTTRAN 单元相关文件	19
2.4.1 结果文件	19
2.4.2 打印文件	20
2.4.3 残差文件	20
2.4.4 重启动文件	20
2.4.5 FLOTTRAN 重启动分析 (续算)	21
2.5 提高收敛性和稳定性的常用的工具	21
2.5.1 松弛系数	22
2.5.2 惯性松弛	22
2.5.3 修正的惯性松弛	22
2.5.4 人工粘性	22
2.5.5 速度限制	23
2.5.6 面积积分阶次	23

2.6	评价 FLOTRAN 分析	23
2.7	验证结果	24
第 3 章	FLOTRAN 流体的基本属性	25
3.1	流体基本属性	26
3.1.1	比热容	26
3.1.2	密度和导热系数	26
3.1.3	粘度	28
3.1.4	表面张力系数	29
3.1.5	壁面静态接触角	29
3.1.6	设置流体性质的步骤	30
3.2	初始属性和变化属性	32
3.3	使用 ANSYS 非牛顿流体性质	32
3.3.1	激活 Power Law 模型	33
3.3.2	激活 Carreau 模型	33
3.3.3	激活 Bingham 模型	34
3.4	用户编程定义属性	34
第 4 章	FLOTRAN 特性	36
4.1	坐标系	36
4.2	旋转参考系	37
4.3	涡流	38
4.4	分布式阻力	38
4.5	FLOTRAN 设置命令	39
4.5.1	FLOTRAN 求解控制命令	39
4.5.2	FLOTRAN 执行及输出控制命令——稳态控制参数设置	40
4.5.3	FLOTRAN 执行及输出控制命令—瞬态控制参数设置	41
4.5.4	FLOTRAN 输出及保存文件控制	43
4.5.5	FLOTRAN 输出收敛监测量的控制	46
4.5.6	FLOTRAN 流体类型及其特性的可变性控制	46
4.5.7	FLOTRAN 流体性质参数设定	48
4.5.8	FLOTRAN 分析的坐标系统的指定	49
4.5.9	FLOTRAN 分析参考条件的设置	50
4.5.10	指定 FLOTRAN 分析的旋转坐标系统	51
4.5.11	指定 FLOTRAN 分析的重力加速度	52
4.5.12	设置有助于 FLOTRAN 求解稳定的参数	53
4.5.13	设定 FLOTRAN 自由度松弛系数	53
4.5.14	设定 FLOTRAN 流体性质松弛因子	54
4.5.15	设置 FLOTRAN 分析的自由度限值	55
4.5.16	选择 FLOTRAN 各自由度相应的求解器	55
4.5.17	对 FLOTRAN 各求解器的控制	57

4.5.18 设置 FLOTTRAN 湍流模型的一些常数	63
4.5.19 重新设定 FLOTTRAN 各分析参数的值	65
4.5.20 控制 FLOTTRAN 面积积分的阶次(Quadrature Order)	67
4.5.21 FLOTTRAN 多组份疏运分析的设置及控制	67
4.5.22 定义 FLOTTRAN 的重启动(续算)控制	74
4.5.23 设置并执行一个零迭代 FLOTTRAN 分析	76
第 5 章 FLOTTRAN CFD 求解器和矩阵方程	78
5.1 三对角矩阵算法	79
5.2 半直接求解	79
5.2.1 预条件广义最小残差(PGMR)求解器	80
5.2.2 预条件 BICGStab(PBCGM)求解器	81
5.3 稀疏直接求解	82
第 6 章 层流和湍流不可压缩流动 FLOTTRAN 分析及实例	83
6.1 激活湍流模型	83
6.1.1 雷诺数	83
6.1.2 层流和湍流的判断	84
6.1.3 湍流比和入口参数	84
6.1.4 湍流模型	84
6.2 网格要求	87
6.3 流动边界条件	88
6.4 难点问题分析	91
6.5 问题描述	92
6.5.1 模型尺寸	92
6.5.2 理论假设	93
6.6 2-D 管道流动分析(层流模型)	94
6.6.1 前处理	94
6.6.2 求解	100
6.6.3 后处理	103
6.7 2-D 管道流动分析(增加来流速的层流模型)	107
6.7.1 前处理	107
6.7.2 求解过程	114
6.7.3 后处理	117
6.8 2-D 管道流动分析(增加出口段长度的层流模型)	121
6.8.1 前处理	121
6.8.2 求解过程	127
6.8.3 后处理	129
6.9 2-D 管道湍流流动分析(增加出口段长度的湍流模型)	134
6.9.1 前处理	134
6.9.2 求解过程	140

6.9.3 后处理.....	142
第7章 FLOTTRAN 热分析及实例	147
7.1 FLOTTRAN 热分析简介.....	147
7.1.1 FLOTTRAN 热分析的功能	147
7.1.2 FLOTTRAN 热分析的基本要求	148
7.2 FLOTTRAN 热分析求解.....	149
7.2.1 FLOTTRAN 热分析的求解内容	149
7.2.2 FLOTTRAN 热分析方法.....	150
7.2.3 FLOTTRAN 热分析的基本步骤	151
7.3 求解方法	152
7.3.1 连续流体性质	152
7.3.2 强制对流	152
7.3.3 自然对流	153
7.3.4 共轭传热	153
7.4 层流流体受均匀壁面热通量	155
7.4.1 问题描述	155
7.4.2 前处理	156
7.4.3 求解.....	166
7.4.4 后处理	171
7.5 空腔中空气的热稳态层流分析	178
7.5.1 问题描述	178
7.5.2 前处理.....	179
7.5.3 求解.....	186
7.5.4 后处理.....	189
第8章 VOF 模型分析及实例	195
8.1 VFRC 载荷.....	195
8.1.1 初始 VFRC 载荷	195
8.1.2 建立 VFRC 载荷的边界.....	196
8.2 输入设置	197
8.2.1 外界条件	197
8.2.2 VFRC 公差.....	198
8.2.3 VOF 时间步.....	198
8.3 通过障碍物的水流流动初步发展分析	199
8.3.1 问题描述	199
8.3.2 前处理.....	199
8.3.3 求解.....	214
8.3.4 后处理.....	217
8.4 大坝 VOF 分析	221
8.4.1 问题描述	221

8.4.2 前处理	221
8.4.3 求解	229
8.4.4 后处理	232
8.5 震荡液滴的 VOF 模型分析	236
8.5.1 问题描述	236
8.5.2 前处理	236
8.5.3 求解	244
8.5.4 后处理	248
第 9 章 可压缩流动 FLOTTRAN 分析及实例	251
9.1 可压缩流动 FLOTTRAN 分析简介	251
9.1.1 物理性质计算	252
9.1.2 边界条件	253
9.1.3 结构和非结构网格	253
9.1.4 求解方案	254
9.2 喷管内超音速可压缩流动分析	255
9.2.1 问题描述	255
9.2.2 前处理	255
9.2.3 求解	266
9.2.4 后处理	276
第 10 章 动网格的 ALE 分析及实例	280
10.1 ALE 方法简介	280
10.2 对称扭转 ALE 分析	282
10.2.1 问题描述	282
10.2.2 前处理	284
10.2.3 求解	297
10.2.4 后处理	301
10.3 容积可变式容器的 ALE/VOF 分析	304
10.3.1 问题描述	304
10.3.2 前处理	305
10.3.3 求解	317
10.3.4 后处理	320
10.4 动圆柱的 ALE 分析	322
10.4.1 问题描述	322
10.4.2 前处理	323
10.4.3 求解	336
10.4.4 后处理	340
10.4.5 思考与讨论	343
第 11 章 多组分传输分析及实例	345
11.1 混合类型	345

11.2 多组分传输分析的基本步骤	346
11.3 两相热交换分析及实例	348
11.3.1 问题描述	348
11.3.2 前处理	349
11.3.3 求解.....	361
11.3.4 后处理	371
11.4 3种气体混合分析及实例.....	374
11.4.1 问题描述	374
11.4.2 前处理	375
11.4.3 求解.....	387
11.4.4 二次前处理	390
11.4.5 二次求解	402
11.4.6 后处理	405
第12章 声学分析及实例.....	410
12.1 声学分析步骤	410
12.1.1 建立模型	410
12.1.2 划分网格	412
12.1.3 设置边界条件并计算.....	413
12.2 流固耦合声学分析	415
12.2.1 问题描述	415
12.2.2 前处理	416
12.2.3 求解.....	430
12.2.4 后处理	432
12.3 房间内的声学分析	439
12.3.1 问题描述	439
12.3.2 前处理	440
12.3.3 求解.....	456
12.3.4 后处理	457
参考文献	460

第1章 FLOTRAN 流体分析概述

内容 提要

本章主要介绍了 FLOTRAN 流体分析的基本概念和分析类型。

分析类型主要有层流分析、湍流分析、热分析、可压缩流动分析、非牛顿流体流动分析、多组分传输分析、自由表面分析。



本章重点



了解 FLOTRAN 流体分析的基本概念



了解 FLOTRAN 分析类型

1.1 FLOTRAN CFD 分析的概念

ANSYS 程序中 FLOTRAN CFD 分析功能是用于分析二维及三维流体流动场工具。用 ANSYS 中用于 FLOTRAN CFD 分析的 FLUID 141 和 FLUID 142 单元,可解决如下问题:

(1) 作用于气动翼(叶)型上的升力和阻力。

(2) 超声速喷管中的流场。

(3) 弯管中流体的复杂的三维流动。

同时, FLOTRAN 还具有如下功能:

(1) 计算发动机排气系统中气体的压力及温度分布。

(2) 研究管路系统中热的层化及分离。

(3) 使用混合流研究来估计热冲击的可能性。

(4) 用自然对流分析来估计电子封装芯片的热性能。

(5) 对含有多种流体的(由固体隔开)热交换器进行研究。

1.2 FLOTRAN 分析类型

FLOTRAN 可执行如下分析:

- (1) 层流分析。
- (2) 湍流分析。
- (3) 热分析。
- (4) 可压缩流动分析。
- (5) 非牛顿流体流动分析。
- (6) 多组分传输分析。
- (7) 自由表面分析。

这些分析类型并不相互排斥,例如,一个层流分析可以是传热的或者是绝热的,一个湍流分析可以是可压缩的或者是不可压缩的。

1.2.1 层流分析

层流流动就是流体层与层之间相互没有干扰,层与层之间既没有质量的传递也没有动量的传递。判断流动是否是层流,是看其雷诺数是否超过临界雷诺数。雷诺数的定义如下:

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

式中 V ——截面的平均速度;

L ——特征长度;

ν ——流体的运动粘度。

对于圆形管内流动,特征长度 L 取圆管的直径 d 。一般认为临界雷诺数为 2320,即:当 $Re < 2320$ 时,管中是层流。

层流中速度场都是平滑而有序的,高粘性流体(如石油等)的低速流动就通常是层流。

1.2.2 湍流分析

湍流流动就是层与层之间相互干扰,而且干扰的力度还会随着流动而加大,层与层之间既有质量的传递也有动量的传递。判断流动是否是湍流,是看其雷诺数是否超过临界雷诺数。对于圆形管内流动,一般认为临界雷诺数为 2320,即:当 $Re > 2320$ 时,管中是湍流。

湍流分析用于处理那些由于流速足够高和粘性足够低而引起湍流波动的流体流动情况,ANSYS 中的二方程湍流模型考虑了在平均流动下的湍流速度波动的影响。如果流体的密度在流动过程中保持不变或者当流体压缩时只消耗很少的能量,则该流体就可认为是不可压缩的,不可压缩流的温度方程将忽略流体动能的变化和粘性耗散。

1.2.3 热分析

流体分析中通常还会求解流场中的温度分布情况。如果流体性质不随温度而变,就可不解温度方程。在共轭传热问题中,要在同时包含流体区域和非流体区域(即固体区域)的整个区域上求解温度方程。在自然对流传热问题中,流体由于温度分布的不均匀性而导致流体密度分布的不均匀性,从而引起流体的流动,与强迫对流问题不同的是,自然对流

通常都没有外部的流动源。

1.2.4 可压缩流动分析

对于高速气流, 由很强的压力梯度引起的流体密度变化将显著地影响流场的性质, ANSYS 对于这种流动情况会使用不同的解算方法。

1.2.5 非牛顿流动分析

应力与应变率之间成线性关系的这种理论并不能足以解释很多流体的流动, 对于这种非牛顿流体, ANSYS 程序提供了三种粘性模式和一个用户自定义子程序。

1.2.6 多组分传输分析

这种分析通常是用于研究有毒流体物质的稀释或大气中污染气体的传播情况, 同时, 它也可用于研究有多种流体同时存在 (但被固体相互隔开) 的热交换分析。

1.2.7 自由表面分析

自由表面分析可以求解无约束气液表面问题, 可以解决二维平面和轴对称问题。

第2章 FLOTRAN 分析的基本原理

内容提要

在进行 FLOTRAN 分析之前,需要了解 FLOTRAN 单元类型、FLOTRAN 分析步骤、FLOTRAN 分析工具以及如何进行分析评价。



本章重点



了解 FLOTRAN 单元特点



理解 FLOTRAN 分析步骤



了解 FLOTRAN 分析步骤, 以及如何进行分析评价

2.1 FLOTRAN 单元的特点

ANSYS 中的 FLOTRAN 单元, 即 FLUID141 和 FLUID142, 用于解算单相粘性流体的二维和三维流动、压力和温度分布。对于这些单元, ANSYS 通过质量、动量和能量 3 个守恒定律来计算流体的速度分量、压力以及温度。下面介绍 FLUID141 和 FLUID142 单元。

2.1.1 FLUID141 单元

1. FLUID141 单元特征

维数: 二维;

形状: 四节点四边形或三节点三角形;

自由度: 速度、压力、温度、湍流动能、湍流能量耗散、多达 6 种流体的各自质量所占的份额。

2. FLUID141 单元描述

FLUID141 可以用来建立包括流体和(或)非流体区域的瞬态或稳态流体、热系统的模型。在流体区域求解粘性流体流动和能量守恒方程, 而在非流体区域只能求解能量方程。用这个 FLOTRAN CFD 单元求解一个区域内的流动和温度分布, 这和用于建立钩结在一起的一维区域网络模型的单元(例如 FLUID116)相反。在一个流固耦合系统中也可以使用

FLUID141。在Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench中可以看到关于这个单元 FLUID141 的更多细节。

对于 FLOTRAN CFD 单元, 根据动量守恒原理可以得到速度, 根据质量守恒原理可以得到压力 (如果需要的话, 可根据能量守恒原理得到温度)。使用分离顺序求解运算法则, 即分别求解根据对每个自由度控制方程的有限元离散得到的矩阵系统。流动问题时非线性的, 且控制方程耦合在一起。与任意依赖于温度或压力的性质的校正联系在一起, 所有控制方程的顺序求解构成了整体迭代。依赖于问题的尺寸和稳定性, 需要得到收敛解的整体迭代数可能会适当地变化。对于多达六种的质量分率可求解输送方程。

在一个以恒定角速度旋转的坐标中可以求解方程系。自由度为速度, 压力和温度。如果使用一个任意的湍流模型, 可以计算两个湍流量: 湍动能和湍流能量耗散率。对于轴对称模型, 可以计算垂直于平面的一个任意的涡旋速度 V_z 。在进口处或一个边界 (移动壁面) 上也可以得到漩涡。

图 2-1 所示 FLUID141 的几何形状显示了这个单元的几何形状、节点位置和坐标系。可以通过 3 个节点 (三角形) 或 4 个节点 (四边形) 及均匀的材料性质定义单元。根据 KEYOPT(3) 的值选择坐标系, 而坐标系可以是笛卡尔、轴对称或极坐标系。

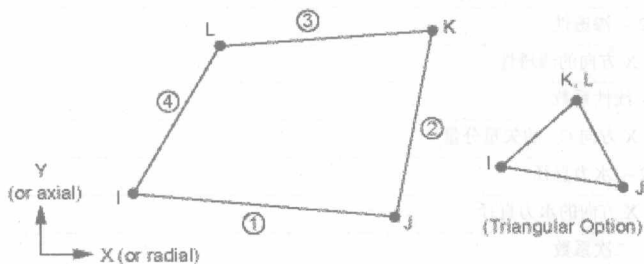


图 2-1 FLUID141 的几何形状

节点和单元载荷描述了单元载荷。对于流固交互分析, 使用命令 SF 系列 (SF, SFA, SFE, 或 SFL) 和 FSIN 表面载荷标签来施加流固交互标记。在发生载荷传递的固体分界面处也必须施加相同的分界面数。

(1) FLUID141 流体单元。若一个 FLUID141 单元的材料数为 1, 就假设此单元为一个流体单元。其性质——密度、粘度、导热系数和比热容可通过一系列 FLDATA 命令来定义。只能分析一种流体, 且流体必须处在单相中。仅当问题在本质上为热问题时, 导热系数和比热容才是相关的 (及必需的)。通过由 FLDATA7, PROT 命令确定的关系或者通过一个性质数据库 (文件 floprp.ans), 性质可以是温度的函数。除此之外, 如果流体为空气或一种气体, 其密度可能随压力变化 (由理想气体定理)。

可用 6 个湍流模型。用 FLDATA1,SOLU,TURB,T 命令激活湍流模型。沿着标准 k-ε 模型 4 个延展方向用标准 k-ε 模型和零方程湍流模型 KEYOPT(1)激活了 multiple species transport, 这使得在主流体中能够追踪多达 6 种不同流体 (种类) 的输送。当使用任意拉格朗日-欧拉方程时, KEYOPT(4)能够使用位移 DOF 来确定边界的运动。

如表 2-1 所示 FLUID141 实常数, 当且仅当一个分布阻力 (FLUID141 分布阻力), 一个风扇模型 (FLUID141 风扇模型), 一个壁面粗糙度 (FLUID141 壁面粗糙度), 或一个 ALE

公式包括在内时，实常数才是必需的。

表 2-1 FLUID141 实常数

编号	名称	定义和类型编号	单位
1	类型	分布阻力或风扇模型的类型:	
		1 = 分布阻力: 等方性的	-
		2 = 分布阻力: 一维	-
		3 = 分布阻力: 依赖于方向	-
		4 = 风扇模型: 与坐标轴相关	-
2	(空白)	1, 2, 3 - 不使用	-
	DIR	4 - 风扇方向: 1 = X, 2 = Y, 3 = Z	-
	(空白)	5 - 不使用	-
3	K	1, 2 - 无量纲压头损失/长度	1/L
	K _x	3 - X 方向的压头损失	1/L
	C ₁	4 - 常数项	M/L ² t ²
	C _{1x}	5 - X 方向 C ₁ 的矢量分量	M/L ² t ²
4	C	1, 2 - 渗透性	1/L ²
	C _x	3 - X 方向的渗透性	1/L ²
	C ₂	4 - 线性系数	M/L ³ t
	C _{2x}	5 - X 方向 C ₂ 的矢量分量	M/L ³ t
5	D _h	1, 2 - 水力直径	L
	D _{hx}	3 - X 方向的水力直径	L
	C ₃	4 - 二次系数	M/L ⁴
	C _{3x}	5 - X 方向 C ₃ 的矢量分量	M/L ⁴
6	a	1, 2 - 计算摩擦系数时使用的雷诺数的系数	-
	a _x	3 - X 方向的系数 a	-
	(空白)	4, 5 - 不使用	-
7	b	1, 2 - 计算摩擦系数时使用的雷诺数的指数	-
	b _x	3 - X 方向的指数 b	-
	(空白)	4, 5 - 不使用	-
8	(空白)	1 - 不使用	-
	FLDIR	2 - 流动方向 1 = X, 2 = Y, 3 = Z	-
	K _y	3 - Y 方向的压头损失	1/L
	(空白)	4 - 不使用	-
9	(空白)	5 - Y 方向 C ₁ 的矢量分量	M/L ² t ²
	(空白)	1, 2 - 不使用	-
	C _y	3 - Y 方向的渗透性	1/L ²
	(空白)	4 - 不使用	-
10	(空白)	5 - Y 方向 C ₂ 的矢量分量	M/L ³ t
	(空白)	1, 2 - 不使用	-
10	(空白)	3 - Y 方向的水力直径	L

(续)

编号	名称	定义和类型编号	单位
	(空白)	4-不使用	-
	C _{3y}	5-Y 方向 C ₃ 的矢量分量	M/L ⁴
11	(空白)	1, 2- 不使用	-
	a _y	3-Y 方向上雷诺数的系数	-
	(空白)	4, 5- 不使用	-
12	(空白)	1, 2- 不使用	-
	b _y	3-Y 方向上雷诺数的指数	-
	(空白)	4, 5- 不使用	-
13	(空白)	1, 2- 不使用	-
	K _z	3-Z (涡旋) 方向上的压头损失	1/L
	(空白)	4- 不使用	-
	C _{1z}	5-Z (涡旋) 方向上 C ₁ 的矢量分量	M/L ² t ²
14	(空白)	1, 2- 不使用	-
	C _z	3-Z (涡旋) 方向上的渗透性	1/L ²
	(空白)	4-不使用	-
	C _{2z}	5-Z (涡旋) 方向上 C ₂ 的矢量分量	M/L ³ t
15	(空白)	1, 2- 不使用	-
	D _{hz}	3-Z (涡旋) 方向上的水力直径	L
	(空白)	4- 不使用	-
	C _{3z}	5-Z (涡旋) 方向上 C ₃ 的矢量分量	M/L ⁴
16	(空白)	1, 2- 不使用	-
	a _z	3-Z (涡旋) 方向上雷诺数的系数	-
	(空白)	4, 5- 不使用	-
17	(空白)	1, 2- 不使用	-
	b _z	3-Z (涡旋) 方向上雷诺数的指数	-
	(空白)	4, 5- 不使用	-
18	BDTOL	单元出生/死亡公差	L
19	MMFAC	网格变形倍增器	-
20	K _s	局部均匀壁面粗糙度	L
21	CK _s	表示壁面不均匀度的 0.5~1.0 之间的一个经验无量纲系数	-

(2) FLUID141 分布阻力。分布阻力提供了一种便利的方法来估计多孔介质效应或者其他没有实际上建立那些特征的几何形状模型的流动区域特征效应。任一具有分布阻力的流体单元都有一个比赋值 1 大得多的实常数数组[REAL]。

流动阻力被建模成一个分布阻力，可以归因于这些因素中的一个或一系列：局部压头损失 K ，摩擦系数 f ，或渗透性 C 。对于 X 方向如下所示，总压梯度为以上 3 项之和。

$$\frac{\partial p}{\partial x}_{\text{resistance}} = \left\{ -K_p V_x |V| + \frac{f}{D_h} \rho V_x |V| + C_\mu V_x \right\} \quad (2-1)$$