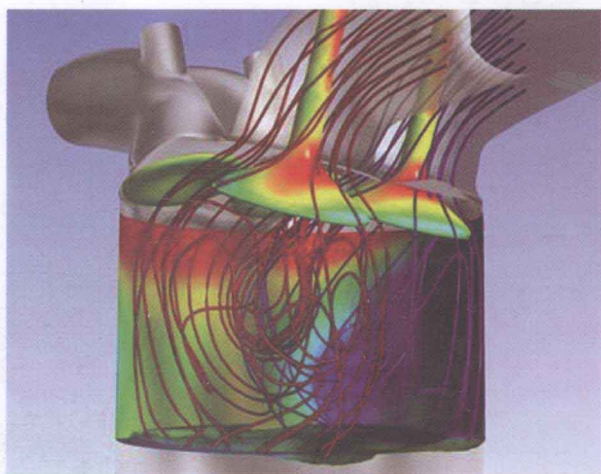


万水CAE技术丛书



FLUENT

周俊杰 徐国权 张华俊 编著

FLUENT

下册

工程技术与实例分析

深入浅出FLUENT流体分析技术

详细剖析FLUENT计算结果所隐藏的含义

配套实际案例模型文件



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 CAE 技术丛书

FLUENT 工程技术与实例分析（下册）

周俊杰 徐国权 张华俊 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书通过大量实例系统介绍了 FLUENT 建模和计算以及后处理的详细过程,可以让读者在短时间内系统掌握数值模拟的基础知识,掌握 FLUENT 的高级应用技术,学会采用 FLUENT 软件进行产品开发。本书共分三篇,第一篇为基础篇,包括 1~4 章,主要讲解流体计算基础、网格划分基础以及 Gambit 工具的应用,并结合计算流体和传热学中的经典算例熟悉 FLUENT 分析问题的过程和方法;第二篇为工程应用篇,包括 5~9 章,系统讲解了 FLUENT 在各种工程背景下的应用,内容涵盖流体机械领域、化工设备领域、换热和制冷领域、热力设备领域和汽车工程领域,通过丰富而细致的应用实例讲解如何应用 FLUENT 来解决应用中出现的问题;第三篇为提高与专题篇,包括 10~15 章,讲解 UDF、UDS、并行计算的专题,针对工程实际的需求,还特别讲解了与 FLUENT 配合使用的数据后处理工具的应用技巧,最后对多相流和动网格模型进行了讲解。

本书在写作过程中注重层次递进,深入浅出地讲解 FLUENT 流体分析方面的技术,通过大量丰富、有深度的应用案例讲解 FLUENT 的应用,并且实例来自科研和生产一线,对解决实际工程和科研问题会有很大帮助。此外,为了方便读者学习,本书还配套模型文件,以提高读者的学习效率。

本书既是利用 FLUENT 软件进行高级应用计算的工程技术相关计算指导书,又可作为高等院校相关专业本科生和硕士生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

FLUENT 工程技术与实例分析:全2册/周俊杰,徐国权,张华俊编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013.4

(万水CAE技术丛书)

ISBN 978-7-5170-0573-5

I. ①F… II. ①周… ②徐… ③张… 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(2013)第011883号

策划编辑:杨元泓 责任编辑:宋俊娥 封面设计:李 佳

书 名	万水 CAE 技术丛书
作 者	FLUENT 工程技术与实例分析(下册) 周俊杰 徐国权 张华俊 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	永清县晔盛亚胶印有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 总32印张 总820千字
版 次	2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
印 数	0001—3000册
总 定 价	110.00元(上、下册)

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

工业发展是我国经济发展的主要推动力，但也是污染物排放的主要来源，随着节能减排和低碳经济压力的不断提高，高耗能高污染企业研发重点转向大量设备的开发。为早日实现节能减排目标，本书从几个典型行业选取过程设备和机械进行分析计算，为产品开发和设计者提供一个可供参考的例子。

任何流体运动的规律均是以质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律和组分守恒定律为基础的。这些基本定律可由数学方程组来描述。采用数值计算方法，通过计算机求解这些控制流体流动的数学方程组，进而研究流体的运动规律，这就是计算流体动力学（CFD）。计算流体动力学是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础上的一门新学科，通过计算机数值计算和图像显示方法，在时间和空间上定量描述流场的数值解，从而达到对物理问题进行研究的目的。

目前，比较著名的有 FLUENT、CFX、STAR-CD 和 PHOENICS 等，而 FLUENT 是国际上比较流行的商用 CFD 软件包，市场占有率高、计算准确、界面友好、使用简单、应用领域广、物理模型多。

正是因为 FLUENT 在流体工程模拟计算中的重要作用，高校和企业科技人员对学习 FLUENT 的热情很高，但往往很难应用到产品开发过程中，本书从 FLUENT 基础、工程应用到提高系统介绍 FLUENT 相关知识以及典型行业的实例。

本书内容共分三篇，15 章，本书通过大量实例系统介绍了 FLUENT 建模和计算以及后处理的详细过程，可以让读者在短时间内系统掌握数值模拟的基础知识，掌握 FLUENT 的高级应用技术，学会采用 FLUENT 软件进行产品的开发。本书第一篇为基础篇，包括 1~4 章，主要讲解流体计算基础、网格划分基础以及 Gambit 工具的应用、结合计算流体和传热学中的经典算例熟悉 FLUENT 分析问题的过程和方法；第二篇为工程应用篇，包括 5~9 章，系统讲解了 FLUENT 在各种工程背景下的应用，内容涵盖流体机械领域、化工设备领域、换热和制冷领域、热力设备领域和汽车工程领域，其中通过丰富而细致的应用实例来讲解如何应用 FLUENT 解决应用中出现的问题；第三篇为提高与专题篇，包括 10~15 章，讲解了 UDF、UDS、并行计算的专题，针对于工程实际的需求，还特别讲解了与 FLUENT 配合使用的数据后处理工具的应用技巧，最后对多相流和动网格模型进行了讲解。

本书在写作过程中注重层次递进，深入浅出地讲解 FLUENT 流体分析方面的技术，并通过大量丰富且有深度的应用案例来讲解 FLUENT 的应用，实例均来自于科研和生产一线，对于解决实际工程和科研问题会有很大的帮助。此外，为了方便读者的学习，本书还配套有模型文件，以提高读者的学习效率。

本书第一篇由周俊杰教授编写；第二篇、7.4 节和 7.5 节由西安交通大学的张华俊教授编写，第 9 章由通用泛亚技术中心的徐国权工程师编写，剩余章节由周俊杰教授编写；第三篇共 6 章，第 10 章和 14.3 节由通用泛亚技术中心的徐国权工程师编写，其余章节由周俊杰编写，全书由周俊杰教授统稿。

本书在编写过程中研究生刘博完成大量算例和插图，并参与编写部分章节初稿，博士生

刘兵参与第一章编写，研究生耿艳辉完成风机的算例，张钰、赵书臣、喻舒婷、陶钧、宋晓磊、李召召和邓继容等参与文字和图片的处理，参与具体工作的还包括：王斌、张强林、万雷、张赛桥、王晓、陈军、赵会春等，在此一并感谢。在本书的编写过程中，得到院领导魏新利院长和王定标副院长的大力支持，也得到同事曹海亮博士、李言钦博士、付卫东博士等同事帮助，在此感谢。本书部分材料参考流体中文网和清洁能源网等论坛，感谢同行的交流。

本书在编写过程中，得到了编辑的热心指导和大力协助，编写共花费一年半的时间，在此期间也获得了合作者的理解与支持，也正是你们的宽容和谅解，使得本书能够顺利出版。由于编者水平有限，书中难免有不当之处，还请广大读者批评指正。

编 者
2010 年元月

目 录

前言

上 册

第1章 概述.....1	2.6.1 概述.....27
1.1 序言.....1	2.6.2 边界条件.....27
1.2 基本思想.....2	2.6.3 初始条件.....34
1.3 主要应用领域.....3	2.6.4 UDF 与边界条件.....34
1.4 常用流体分析软件比较.....4	2.7 软件基本结构.....35
1.5 本章小结.....6	2.7.1 概述.....35
第2章 FLUENT 基础.....7	2.7.2 前处理.....35
2.1 概述.....7	2.7.3 求解器.....35
2.2 流体流动基本特性.....8	2.7.4 后处理.....35
2.2.1 基本的物理概念.....9	2.8 求解过程.....36
2.2.2 流动状态.....9	2.8.1 建立控制方程.....37
2.2.3 湍流模型.....9	2.8.2 确定边界条件与初始条件.....37
2.2.4 多相流模型.....13	2.8.3 划分计算网格.....37
2.3 控制方程.....14	2.8.4 建立离散化方程.....37
2.3.1 连续性方程.....14	2.8.5 离散初始条件和边界条件.....37
2.3.2 N-S 方程.....14	2.8.6 给定求解控制参数.....38
2.3.3 能量守恒方程.....15	2.8.7 求解离散方程.....38
2.3.4 其他方程.....16	2.8.8 判断解的收敛性.....38
2.3.5 通用控制方程.....16	2.8.9 输出结果.....38
2.4 数值求解方法.....17	2.9 本章小结.....38
2.4.1 概述.....17	第3章 网格生成技术.....39
2.4.2 有限差分法.....17	3.1 概述.....39
2.4.3 有限元法.....19	3.2 结构化网格.....40
2.4.4 有限容积法.....20	3.2.1 单块结构网格生成技术.....40
2.4.5 谱方法.....20	3.2.2 分区结构网格生成方法.....41
2.4.6 边界元法.....22	3.3 非结构化网格.....42
2.5 离散格式.....25	3.4 Gambit 的使用.....44
2.5.1 概述.....25	3.4.1 Gambit 的用户界面.....45
2.5.2 一阶差分格式.....25	3.4.2 绘制几何图形.....46
2.5.3 高阶差分格式.....25	3.4.3 绘制网格.....47
2.6 边界条件.....27	3.4.4 Gambit 几何图形绘制实例.....49

3.4.5 FLUENT 的安装与运行	67	5.2 泵分析实例	115
3.4.6 FLUENT 的用户界面	68	5.2.1 概述	116
3.4.7 数值模拟步骤简介	71	5.2.2 数学物理建模	117
3.5 本章小结	72	5.2.3 边界条件	121
第 4 章 FLUENT 基本算例	73	5.2.4 求解计算	121
4.1 概述	73	5.2.5 结果分析与讨论	128
4.2 顶盖驱动流	73	5.3 风机分析实例	134
4.2.1 物理模型	73	5.3.1 概述	134
4.2.2 在 Gambit 中建立模型	74	5.3.2 数学物理建模	138
4.2.3 求解计算	75	5.3.3 边界条件	146
4.2.4 计算结果	78	5.3.4 求解计算	146
4.3 后台阶流动	80	5.3.5 结果分析与讨论	154
4.3.1 物理模型	81	5.4 本章小结	158
4.3.2 在 Gambit 中建立模型	81	第 6 章 FLUENT 在化工设备领域的应用	159
4.3.3 求解计算	83	6.1 搅拌设备	159
4.3.4 计算结果	85	6.1.1 概述	159
4.4 圆柱绕流	86	6.1.2 数学物理建模	162
4.4.1 基本理论与物理模型	86	6.1.3 边界条件	166
4.4.2 在 Gambit 中建立模型	87	6.1.4 求解计算	166
4.4.3 求解计算	89	6.1.5 结果分析与讨论	169
4.4.4 计算结果	92	6.2 混合设备	174
4.5 圆管流动	95	6.2.1 概述	175
4.5.1 物理模型	95	6.2.2 数学物理建模	176
4.5.2 在 Gambit 中建立模型	95	6.2.3 边界条件	182
4.5.3 求解计算	97	6.2.4 求解计算	182
4.5.4 计算结果	99	6.3 本章小结	192
4.6 弯通道流动	101	第 7 章 FLUENT 在换热及制冷领域的应用	193
4.6.1 物理模型	101	7.1 概述	193
4.6.2 在 Gambit 中建立模型	101	7.2 管壳式换热器	194
4.6.3 求解计算	103	7.2.1 概述	194
4.6.4 计算结果	106	7.2.2 数学物理建模	196
4.7 方腔自然对流	107	7.2.3 边界条件	205
4.7.1 物理模型	107	7.2.4 求解计算	205
4.7.2 在 Gambit 中建立模型	107	7.2.5 结果分析与讨论	215
4.7.3 求解计算	108	7.3 管翅式换热器	222
4.7.4 计算结果	112	7.3.1 概述	222
4.8 本章小结	114	7.3.2 数学物理建模	222
第 5 章 FLUENT 在流体机械领域的应用	115	7.3.3 边界条件	232
5.1 概述	115	7.3.4 求解计算	232

7.3.5 结果分析与讨论	237
7.4 空气对流换热的场协同原理分析	244
7.4.1 场协同基本思想介绍	244
7.4.2 场协同评价指标的分析和探讨	244
7.4.3 带芯棒圆管换热的场协同原理分析	246
7.5 制冷剂管内换热的场协同原理分析	251
7.5.1 制冷剂蒸气光管内换热的场协同分析	251
7.5.2 内横槽管制冷剂蒸气换热的场协同分析	258
7.5.3 光管内液体制冷剂换热的场协同分析	264
7.5.4 液体制冷剂内横槽管换热的场协同分析	267
7.6 减阻节能	274
7.7 本章小结	275

第 8 章 FLUENT 在热力设备领域的应用	276
8.1 概述	276
8.2 锅炉	276
8.2.1 概述	277
8.2.2 数学物理建模	277
8.2.3 边界条件	283
8.2.4 求解计算	284
8.2.5 结果分析与讨论	286
8.3 燃烧器	288
8.3.1 概述	289
8.3.2 数学物理建模	291
8.3.3 边界条件	297
8.3.4 求解计算	298
8.3.5 结果分析和讨论	305
8.4 本章小结	312

下 册

第 9 章 FLUENT 在汽车工程领域的应用	313
9.1 概述	313
9.1.1 夏季空调的试验标准	313
9.1.2 冬季空调的试验标准	314
9.1.3 湍流流动及其数值模拟概述	314
9.1.4 室内气流分布的性能评价	315
9.1.5 离散传播辐射模型 (DTRM)	316
9.2 轿车整车室内夏季空调环境的模拟	318
9.2.1 概述	318
9.2.2 数学物理模型	318
9.2.3 边界条件的设置	320
9.2.4 求解计算	324
9.2.5 结果分析与讨论	334
9.3 轿车整车室内冬季空调环境模拟	339
9.3.1 概述	340
9.3.2 数学物理建模	340
9.3.3 边界条件的设置	341
9.3.4 求解计算	343
9.3.5 结果分析与讨论	346
9.4 加入有人模型下的探讨	355

9.4.1 概述	355
9.4.2 数学物理模型	356
9.4.3 边界条件设置	357
9.4.4 边界条件设置	357
9.4.5 结果分析与讨论	359
9.5 本章小结	365
第 10 章 UDF	366
10.1 UDF 综述	366
10.1.1 基本概念	366
10.1.2 编写环境	367
10.1.3 多相流应用写 UDFs	369
10.1.4 编译 UDF 到 FLUENT 中	370
10.2 UDF 的宏基础	371
10.2.1 常用的宏工具	373
10.2.2 有关宏的访问工具	374
10.3 综合应用实例	377
10.3.1 试验环境与测试条件	377
10.3.2 试验项目以及测试方法	377
10.3.3 试验结果	378
10.3.4 UDF 设置	379

10.3.5 算例相关设置	381	13.3 Digitizer	447
10.4 本章小结	393	13.3.1 概述	447
第 11 章 UDS 的应用	394	13.3.2 使用技巧	447
11.1 概述	394	13.3.3 综合应用实例	448
11.1.1 自定义标量 UDS 的定义	394	13.4 本章小结	452
11.1.2 对流项的设置	395	第 14 章 多相流模型	453
11.1.3 时间项的设置	395	14.1 概述	453
11.1.4 扩散系数的设置	395	14.2 VOF 模型在射流纺织工程中的应用	454
11.1.5 源项 S 的设置	396	14.2.1 概述	454
11.2 综合实例	397	14.2.2 物理模型和网格划分	456
11.3 本章小结	402	14.2.3 求解计算	456
第 12 章 并行计算	403	14.2.4 计算结果	462
12.1 概述	403	14.3 Mixture 模型	464
12.2 环境设置	405	14.3.1 主要方法	464
12.3 综合应用实例	405	14.3.2 理论方程	464
12.3.1 配置计算节点	406	14.3.3 mixture 模型相变流动中的简单应用	466
12.3.2 检测网络连通性	406	14.4 本章小结	473
12.3.3 网格的分割	407	第 15 章 动网格模型	474
12.3.4 读入 case 文件	408	15.1 概述	474
12.3.5 检查网格分割	409	15.2 方法简介	474
12.3.6 负载分布的检查	409	15.2.1 弹簧光滑模型	474
12.3.7 进行其他设置并计算	410	15.2.2 动态层模型	475
12.4 本章小结	410	15.2.3 局部网格重划法	476
第 13 章 常用数据后处理工具	411	15.3 动网格模型在内燃机汽缸中的应用	477
13.1 Tecplot	411	15.3.1 问题描述	477
13.1.1 概述	411	15.3.2 利用 FLUENT 3D 求解器进行计算	477
13.1.2 使用技巧	412	15.3.3 结果分析	485
13.1.3 综合应用实例	421	15.4 本章小结	488
13.2 Origin	425	附录	489
13.2.1 概述	425	参考文献	494
13.2.2 使用技巧	425		
13.2.3 综合实例	430		

第9章 FLUENT 在汽车工程领域的应用

知识要点

- 轿车整车室内夏季空调环境的模拟
- 轿车整车室内冬季空调环境的模拟
- 加入有人模型下的探讨

9.1 概述

随着中国汽车消费由实用的经济型产品向富含高科技的高档产品的延伸,市场对轿车空调舒适性、节能性方面提出了越来越高的要求,以满足乘坐者的舒适性和驾驶的安全性要求。德国大众、美国通用、日本丰田等知名世界汽车公司一直致力于汽车空调内室环境的试验与研究,在人造环境的不同工况下,对试验过程中的室内温度、环境风速、车速、行驶负荷、风机电压、空调系统高低压等信号进行采集,从而积累了大量的试验数据,对于他们新车型的设计与推出和保持产品竞争力提供了坚实的理论基础。多功能商务车 BPV 近年来逐步进入中国市场,而且发展势头日益迅猛。本章所列举的实例以某 G 型车为参考对象,依据某企业夏季空调 1 标准进行了整车降温试验的仿真模拟,依据某企业冬季空调 2 试验标准进行了整车最大采暖能力试验的仿真模拟。

创建三维模型, Gambit 2.2.30 划分模型生成三角网格,使用基于有限差分法的 FLUENT 6.0 软件进行传热计算,采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型。空调进风条件按实测数据设定,对于门窗边界面考虑日照、对流换热等因素按能量守恒的原理确定各边界传热条件,既要保证收敛速度又要保证收敛精度,采用二阶迎风差分格式, SIMPLER 算法进行迭代计算。同时考虑到车内各个表面辐射的影响,选用 FLUENT 的离散传播辐射模型 (DTRM) 建立车室内的辐射模型,将辐射传热考虑到流场的迭代计算中。

9.1.1 夏季空调的试验标准

企标 1 试验过程:环境温度 $38\pm 1^{\circ}\text{C}$;相对湿度:40%;太阳负荷: $1000\text{w}/\text{m}^2$ 。预浸润与浸润阶段:本阶段是使被试轿车浸润在一定的环境中,使之整体温度均匀(车窗、车门、内室等)后将车内环境温度升至试验前最恶劣的情况。预浸润:风速 $50\text{km}/\text{h}$,持续时间 30 分钟,发动机怠速,日照关,空调风机中挡,车窗摇下。浸润:风速 $5\text{km}/\text{h}$,发动机关,太阳日照开,车窗关闭,持续时间 $\geq 50\text{min}$ 。模式控制:吹面出风模式,风机挡位最大,温度混合风门最冷新风风门开关按试验进程。试验阶段:考验轿车在变风速以及变车速的条件下的空调最大的制冷能力,以及切换新风风门对室内温度的影响,环境风速、车速以 $0-20-40-80-110-0\text{km}/\text{h}$ 阶段变化,每个阶段平稳运行 $20\sim 30$ 分钟。同时配合新风风门由 P/R (内循环)向 OSA (外循环)模式切换,大体试验过程: $50\text{km}/\text{h}$ (P/R, 20 分钟)、 $80\text{km}/\text{h}$ (P/R, 20 分钟)、 $50\text{km}/\text{h}$ (OSA, 20 分钟)、 $80\text{km}/\text{h}$ (OSA, 20 分钟)、怠速 (P/R, 30 分钟)、 $110\text{km}/\text{h}$ (OSA, 20 分钟)、怠速 (OSA, 30 分钟)、 $110\text{km}/\text{h}$ (OSA, 2 分钟)。

9.1.2 冬季空调的试验标准

GMW3040 试验: 本实验模拟轿车空调系统在严寒环境下制热系统的最大工作性能。试验环境温度: $-20 \pm 1^\circ\text{C}$; 预冷环境温度: 低于试验环境温度 5°C , 预冷阶段保证试验车辆整体温度均匀, 直到机油温度达到试验环境温度 $\pm 1^\circ\text{C}$, 试验才能开始。模式设置: 风机最大挡位, 温度风门全热, 外循环, 吹脚模式; 试验进程: 40km/h (OSA, 20 分钟)、60km/h (OSA, 20 分钟)、怠速 (OSA, 10 分钟)。

9.1.3 湍流流动及其数值模拟概述

湍流是一种高度复杂的非稳态带旋转的不规则流动, 出现在速度变动的地方。这种波动使得流体介质之间相互交换动量、能量和浓度变化, 而且引起了数量的波动。这种波动是小尺度且高频率的, 大尺度涡旋主要是由流动的边界条件所决定, 小尺度涡旋主要由粘性力来决定。流体内的不同尺度的涡旋的随机运动造成流体物理量的脉动。

在计算流体力学界对湍流的模拟主要有 Euler 描述法的直接模拟法、大涡模拟、Reynolds 时均方程的模拟方法, 其中 Reynolds 时均方程的模拟方法引入 Boussinesq 假设, 把未知的更高阶的时间平均值表示成较低阶的计算可以定量确定的函数, 因而成为目前工程湍流计算的基本方法。不同的湍流模型, 就是把湍流的脉动值的附加项与时均值联系起来的特定的关系式, 引入 Boussinesq 假设后, 计算湍流流动的关键就在于如何确定湍流粘性系数 η_t 上。

标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型

湍流中单位质量流体脉动动能的耗散率, 即各向同性的小尺度涡的机械能转化为热能的速率, 其中 ε 与 k 的关系为:

$$\varepsilon = c_D \frac{k^{3/2}}{l} \quad (9-1-1)$$

ε 的控制方程:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - c_D \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9-1-2)$$

k 的控制方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \quad (9-1-3)$$

湍流粘性系数 η_t :

$$\eta_t = c'_\mu \rho k^{1/2} l = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon \sigma_t \quad (9-1-4)$$

与温度有关的湍流 P_r 数 σ_T 与时均形式能量方程的广义扩散系数 Γ 的关系为:

$$\Gamma = \frac{\lambda}{c_p} + \frac{\eta_t}{\sigma_T} = \frac{\eta}{\rho_r} + \frac{\eta_t}{\sigma_t} \quad (9-1-5)$$

方程中的其他系数列于表 9-1 中。

表 9-1 $k-\varepsilon$ 两方程模型中的系数

c_μ	c_1	c_2	σ_k	σ_ε	σ_T
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9—1.0

湍流压力的计算:

$$(\tau_{i,j})_t = -\frac{2}{3}\rho\kappa\delta_{i,j} + \eta_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9-1-6)$$

$$\eta_t = c_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon \quad (9-1-7)$$

此外, 还有应用于旋转流动以及流动方向表面曲率变化的影响二阶矩模型对浮升力存在湍流模型; 非线性 $k-\varepsilon$ 模型在原来 Boussinesq 提出的线性项上增加来自速度梯度乘积的非线性项; 多尺度 $k-\varepsilon$ 模型对于圆型射流, 尾迹等流动就得到满意的效果; 重整化群 $k-\varepsilon$ 模型将非稳态的 N-S 方程对一个平衡态作 Gauss 统计展开, 并用对脉动频谱的波数段作滤波的方法, 从理论上导出了高 Re 数 $k-\varepsilon$ 两方程模型; 可实现 $k-\varepsilon$ 模型适用于对时均应变率特别大的情况 ($Sk/\varepsilon > 3.7$) 会导致负的正应力, 计算湍流动力粘度计算式中的系数 C_μ 与应变率联系起来。

9.1.4 室内气流分布的性能评价

气流的分布方式将涉及整个汽车空调系统的耗能、初投资、室内乘坐者的舒适性等方面, 因此对于空调设计理论计算和试验结果的有效性分析具有指导作用。

不均匀系数: 在工作区选择 n 个测点, 分别测得各点的温度与速度, 求得算术平均值和均方根偏差, 从而求得温度不均匀系数和速度不均匀系数:

$$k_t = \frac{\sigma_t}{t} \quad (9-1-8)$$

$$k_u = \frac{\sigma_u}{u} \quad (9-1-9)$$

值得注意的是: 不均匀系数越小, 气流分布的均匀性越好。

空气分布特性指标: 轿车内室环境处于行驶状态, 汽车内室的判据指标应该比房间环境的宽松, 由于缺乏关于汽车空调内室舒适性的计算判断指标, 因而本书采用房间空调环境的舒适性判据予以计算也可看出趋势分布。对舒适性空调而言, 相对湿度在较大的范围内 (30%~70%) 对人体的舒适性较小, 可主要考虑空气温度与风速对于人体的综合作用。根据相关资料, 有效温差与室内风速存在以下关系:

$$\Delta ET = (t_i - t_n) - 7.66(u_i - 0.15) \quad (9-1-10)$$

u_i 是工作区某点的空气流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; t_i 、 t_n 是工作某点的空气温度与给定的室内温度。并且认为在当有效温差 $= -1.7 \sim +1.1$ 之间时, 多数人感到舒适。空气特性分布指标如下:

$$ADPI = \frac{-1.7 < \Delta ET < 1.1 \text{ 的测点数}}{\text{总测点数}} \times 100\% \quad (9-1-11)$$

虽然本书采用静态房间的空气分布特性指标来评价动态的车内环境, 但 ADPI 从侧面角度也能反映出车内各位置舒适性的差异。

能量利用系数: 对于气流分布方式的能量利用有效性, 可以用能量利用系数 η 来表达:

$$\eta = \frac{t_p - t_o}{t_n - t_o} \quad (9-1-12)$$

t_p 、 t_n 、 t_o 分别为排风温度、工作区空气平均温度、送风温度。

当 $t_p > t_n$ 时, $\eta > 1$; $t_p < t_n$ 时, $\eta < 1$ 。

需要指出的是, 该系数越靠近 1 说明送风负荷被充分利用, 能量利用效率越高。

9.1.5 离散传播辐射模型 (DTRM)

采用离散传播辐射模型 (DTRM) 来考虑车室内各个面的辐射对计算区域的换热影响; DTRM 辐射模型的主要假设是用单一的 (辐射) 射线代替从辐射表面沿某个立体角的所有辐射效应。

辐射强度 (辐射密度) 的变化 dI 沿其行程 ds 的微分方程为:

$$\frac{dI}{ds} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi} \quad (9-1-13)$$

其中, a 为气体辐射吸收 (发射, 黑度) 系数; I 为辐射强度/ $\text{kw}\cdot\text{m}^{-2}$, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数。

方程中, 假设气体的折射系数为 1。在 DTRM 模型中, 对上式从边界面出发, 沿辐射行程积分。若沿着射线行程, a 为常数, 那么, 对于 $I(s)$, 有:

$$I(s) = \frac{\sigma T^4}{\pi} (1 - e^{-as}) + I_0 e^{-as} \quad (9-1-14)$$

当跟踪多个表面, 并且射线穿越很多计算单元时, DTRM 的计算量大, 为了减少计算, 辐射表面和吸收辐射的计算单元被分成射线束和辐射吸收体。辐射吸收体的组成由某个计算单元开始, 加上此单元的临近单元, 直到总单元数目达到设定的每个辐射吸收体所包含的单元总数。同理, 射线束的组成由某个面 (单元) 开始, 加上此面单元的临近面, 直到面单元数目达到每个设定的射线束所包含的面单元总数。

对于每个射线束与辐射吸收体, 分别计算其入射辐射通量 q_{in} 与 (能量方程中的) 体积源相。这些量值被分配到射线束与辐射吸收体所包含内的每个单元, 据此来计算壁面与 (计算控制) 单元的温度。表面束与吸收体的温度是通过对面面积的加权平均得到的:

$$T_{sc} = \left(\frac{\sum_f A_f T_f^4}{\sum A_f} \right)^{1/4} \quad (9-1-15)$$

$$T_{vc} = \left(\frac{\sum_c A_c T_c^4}{\sum A_c} \right)^{1/4} \quad (9-1-16)$$

其中, T_{sc} 、 T_{vc} 分别为表面束与吸收体的温度; A_f 、 T_f 分别为某个表面 (单元) 的面积与温度; A_g 、 T_g 分别为某个计算单元 c 的面积与温度。求和是对射线束和吸收体内的所有单元进行的。

执行 Define→Models→Radiation 命令, 打开如图 9-1 所示的 Radiation Model 面板, 激活 DTRM 模型后, FLUENT 在计算过程中更新辐射场, 并且由射线跟踪方法计算能量源相和热流。用户可以更改 Number of DTRM Sweeps 选项以控制全局迭代过程中辐射计算的最大更新次数。默认的辐射更新次数为 1, 这表明辐射强度仅更新一次。若用户增加此数值, 表面辐射强度将更新多次, 直到达到收敛标准或者超过了设定的辐射更新次数。

Tolerance (误差参数, 默认情况为 0.01) 确定了何时辐射强度的迭代达到了收敛标准。误差参数定义为相邻两次 DTRM 的表面辐射强度迭代差值的模。用户也可以控制辐射场在连续相迭代进行时的迭自身代频率。Flow Iterations Per Radiation Iteration 默认情况下为 10 次, 这表示流场或能量场每迭代 10 次, 辐射场迭代一次。

执行 Define→Ray Tracing 命令, 打开 Ray Tracing 对话框, 建立你的 DRTM 模型下的辐射体与辐射面文件, 系统以 *.ray 形式保存, 此后每次读写 case 和 data 文件都将读写 ray 文件。

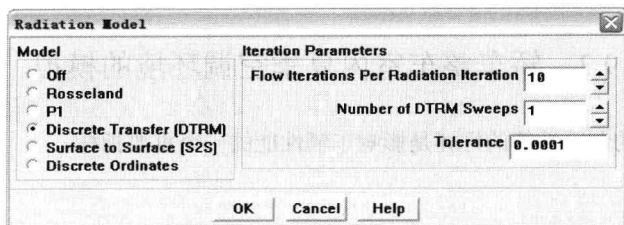


图 9-1 辐射模型面板 (DTRM)

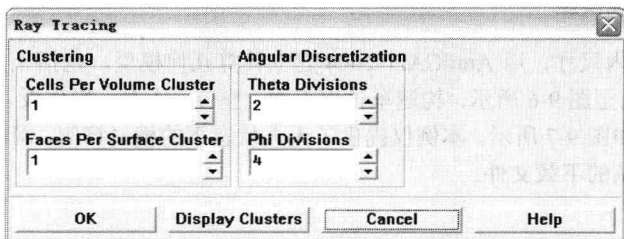
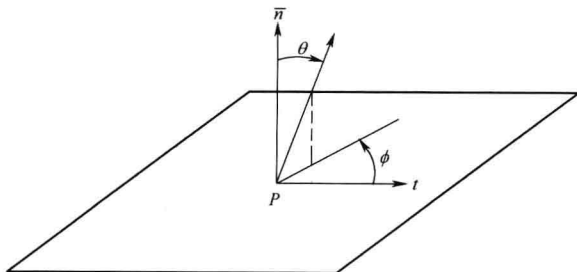


图 9-2 创立 ray 文件面板 (DTRM)

Cells Per Volume Cluster 和 Faces Per Surface Cluster 文本框中给定辐射面或辐射体的辐射表面或吸收性单元的数目。

用户在 Cells Per Volume Cluster 和 Faces Per Surface Cluster 区域的输入将确定辐射面和辐射体内包含的计算单元数。默认情况下, 两项均设定为 1, 因此表面束 (辐射面) 的数目就等于边界面 (单元) 的数目; 辐射体 (辐射吸收单元体) 的数目就等于计算域内的单元总数。对于二维问题, 这些数目是可以承受的, 但对较大规模的问题, 为了减少跟踪射线的计算量, FLUENT 推荐用户需要减少辐射面与辐射体内所包含的单元数目。

用户在 Theta Divisions 和 Phi Divisions 区域的输入将确定每个辐射面所跟踪计算的射线束的数目。如图 9-3 所示, Theta Divisions 确定了表面上围绕 P 点, 用于计算立体角的 θ 角方向的间隔数。立体角的设定基于的 θ 角的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 其默认设置为 2, 这表示从此表面发出的射线间隔角度为 45° (θ 角方向)。Phi Divisions 确定了表面上围绕 P 点, 用于计算立体角的 ϕ 角方向的间隔数。立体角的设定基于的 θ 角的变化范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ (2D) 和 $0^\circ \sim 260^\circ$ (3D), 其默认设置为 2, 这表示从此表面发出的射线间隔角度为 90° (2D) (ϕ 角方向)。此设定与上述的 θ 角的默认设置一起表明了在每个辐射面将会跟踪 4 条射线 (2D)。需要注意的是, 对于 3D 情况, 若要达到上述的相同精度, Phi Divisions 的设定需要为 4。多数情况下, FLUENT 推荐用户至少把 θ 和 ϕ 角的设定数目加倍。

图 9-3 P 点在半球空间沿一定经/纬度角的空间立体角

9.2 轿车整车室内夏季空调环境的模拟

轿车空调夏季的制冷性能的好坏是影响车辆性能的一个重要指标。

9.2.1 概述

依据某企标 1 标准 80km/h 的工况下进行仿真模拟的基础上,进行了舒适性分析。

9.2.2 数学物理模型

依据 G 型车室内尺寸,用 AutoCAD 2004 建立计算几何模型,包括无人状态模型、有人状态模型。如图 9-4 至图 9-6 所示,构造车体内表面、座位、人员、操作板、出风口、车窗等。人体模型尺寸大小如图 9-7 所示。本例仅提供了无人状态下的模型算例,网格与计算文件读者可以参考出版社网站的下载文件。

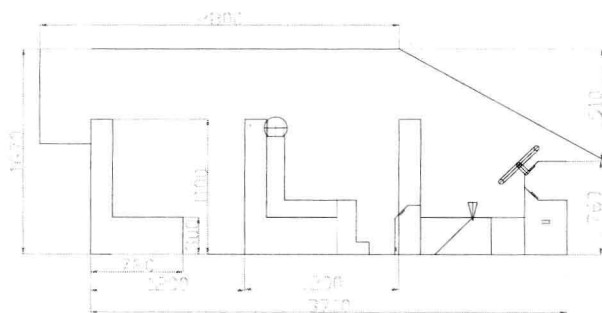


图 9-4 车体建模侧视图

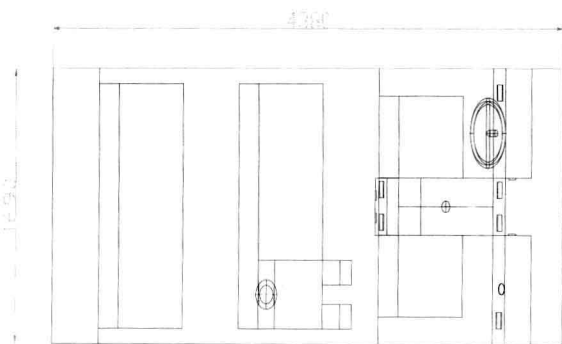


图 9-5 车体建模顶视图

Gambit 划分网格信息如下:作为 FLUENT 专用的网格划分处理软件, Gambit 2.2.03 对各种几何体二维、三维、边界层划分有着强大的功能,以无人状态的车体几何模型为例(如图 9-8 所示):

- 整个节点数: 13777
- 整个单元数: 63818

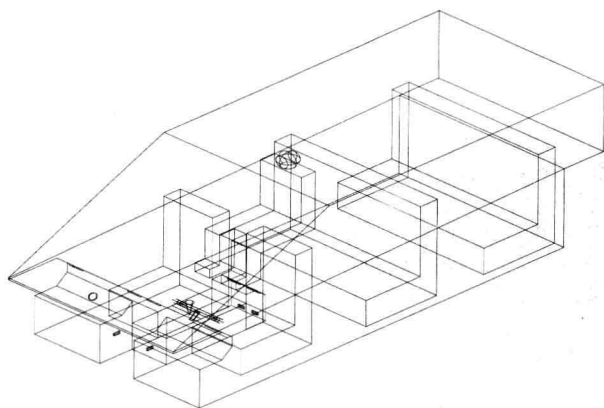


图 9-6 车体整体模型

图 9-7 车内乘坐者尺寸

- 划分网格类型: Tet/Hybrid (四边形/三角形混合)
- 划分方法: Tgrid (三角形)
- 内部划分距离 (Interval Size): 85

网格相关信息:

- 网格区域信息: 区域范围列出了 x、y 和 z 坐标的最大值、最小值
- x 轴尺寸界限: min (m) = -2.290000e+00, max (m) = 2.090000e+00
- y 轴尺寸界限: min (m) = 1.490000e+00, max (m) = 3.200000e+00
- z 轴尺寸界限: min (m) = -2.000000e-02, max (m) = 1.670000e+00
- 单元网格信息统计: 体积统计包括单元体积的最大值、最小值以及总体积
- 最小体积 /m³: 1.963593e-08
- 最大体积 /m³: 4.247903e-04
- 整体体积 /m³: 8.566068e+00

面区域信息统计:

- 最小面积/m²: 1.493329e-06
- 最大面积/m²: 1.566159e-02

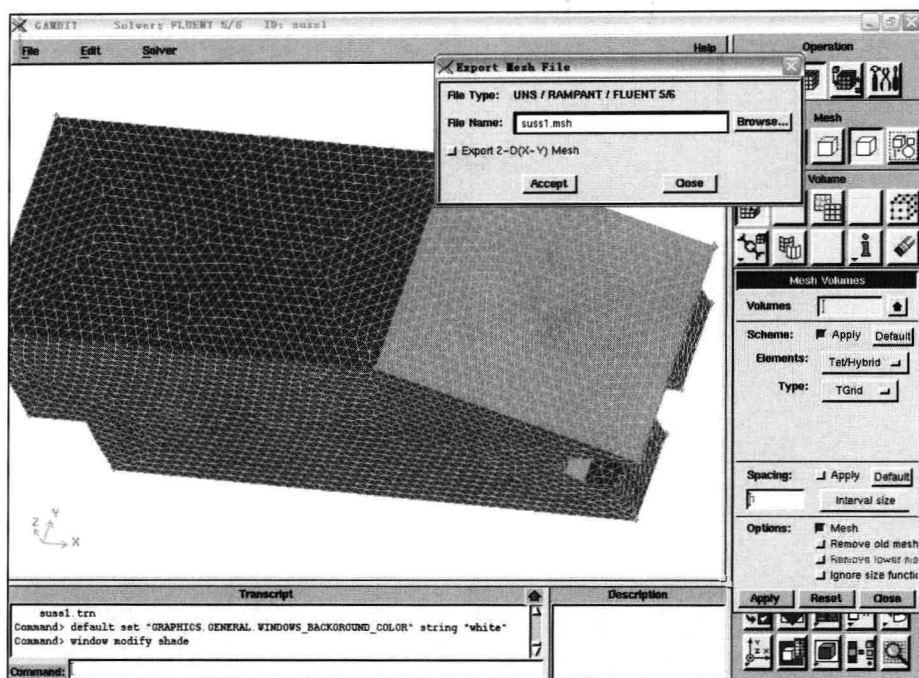


图 9-8 无人状态室内模型的网格划分

9.2.3 边界条件的设置

打开 FLUENT，读入本例的 case 与 data 文件，执行 Grid→check 命令，检查网格的读取情况，可以看到网格的读入信息，并且在窗口报告最后一行显示“done”，说明网格文件读入成功。执行 Grid→Scale 命令，打开对话框，检查网格文件的长度单位定义，如图 9-9 所示。

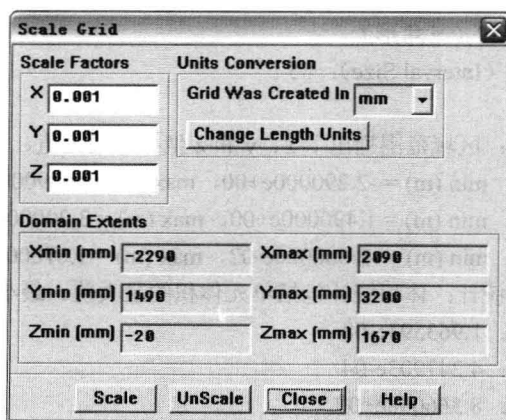


图 9-9 网格单位比例

可以看到 Grids Was Created In 栏应选择 mm 单位，检查 domain extents 各轴上下边界长度是否显示正确，例如 Xmin(m)显示时，需要按 scale 转化单位为 mm，单击 unscale 按钮则进行单位比例转化取消操作，如图 9-10 所示。