



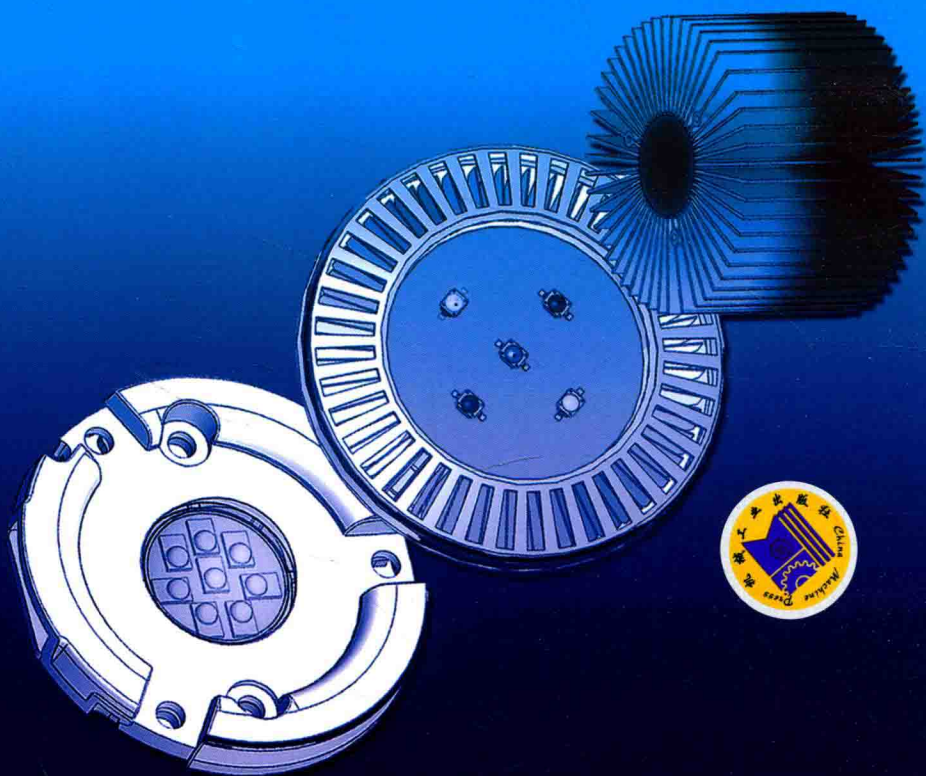
本书附赠全部实例的仿真模型数据
可通过机械工业出版社官方网站下载

FlOEFD

流动与传热仿真

入门及案例分析

李波 陈文鑫  编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

FloEFD 流动与传热 仿真入门及案例分析

李 波 陈文鑫 编著



机械工业出版社

本书是一本全面介绍计算流体动力学软件 FloEFD 软件功能和应用方法的指导性教材, 是基于 FloEFD 14.1 版本进行撰写的。

本书主要内容可以分为两个部分。第 1 部分内容系统地介绍了 FloEFD 的几何模型准备、建立仿真模型、网格划分、求解计算、结果处理和仿真优化。对于上述内容中涉及的计算流体动力学、传热学和流体力学等学科的基础理论, 本书都用相当篇幅简明、扼要地进行了介绍。第 2 部分内容以 FloEFD 行业应用实例为主, 其中包括 LED 工矿灯热仿真实例、LED 射灯热仿真实例、卤素车灯热仿真实例和汽车空调箱线性度仿真。行业应用实例以背景介绍为起始, 通过详细的说明与详尽的操作步骤, 使读者在了解 FloEFD 软件功能的同时, 逐步掌握如何利用 FloEFD 进行流体流动与传热数值仿真分析的基本方法和技巧。

本书可以作为高等院校有关专业研究生教材, 也可供使用 FloEFD 或其他计算流体动力学软件进行仿真分析的专业人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

FloEFD 流动与传热仿真入门及案例分析/李波, 陈文鑫编著.
—北京: 机械工业出版社, 2015.10
ISBN 978-7-111-51410-7

I. ①F… II. ①李… ②陈… III. ①流体动力学—应用软件
IV. ①O351.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 206801 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 任 鑫 责任编辑: 闫洪庆
版式设计: 霍永明 责任校对: 闫玥红
封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 洋
三河市国英印务有限公司印刷
2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 16 印张 · 390 千字
0001—3000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-51410-7
定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

计算流体动力学自 20 世纪 60 年代问世以来之所以发展迅速，是由于计算流体动力学仿真软件具备了低成本仿真复杂或理想物理现象的优点。商业计算流体动力学软件从 20 世纪 80 年代开始兴起，已经从最初应用的航空、汽车和电力能源领域，发展至机械、电子产品、暖通、环境和建筑等许多行业。现今，越来越多的企业意识到商业计算流体动力学软件为企业带来了巨大利益。美国市场研究公司 Aberdeen Group 在 2011 年的研究报告《The ROI of Concurrent Design with CFD》中指出，在产品研发中使用 CFD 进行仿真分析可以使产品质量目标、销售收入目标、保证产品上市日期和成本目标等方面的达标率提升 6% ~ 13%。此外，报告中也显示了现今商业计算流体动力学软件应具备以下特点：与 MCAD 软件结合、网格自动划分、网格具有灵活性和易于操作等。FloEFD 软件不仅仅是一款商业化的计算流体动力学软件，而且其完全嵌入主流 MCAD 软件和自动网格划分的特点引领了商业计算流体动力学软件的发展趋势，将原本深奥和操作复杂的计算流体动力学软件置于设计工程师的桌面。计算流体动力学仿真分析不再属于少数仿真分析专家的独有，企业的产品设计工程师同样可以轻松驾驭这匹高科技“骏马”。撰写一本 FloEFD 书籍的动因正是想让更多的工程师能进行计算流体动力学的仿真分析工作。

全书共分为 14 章，第 1、2 章为计算流体动力学的基础和 FloEFD 软件背景，第 3 ~ 10 章为 FloEFD 软件功能和操作技巧，第 11 ~ 14 章为 FloEFD 行业应用实例。由于本书在写作过程中遵循仿真工作的基本流程，所以建议读者在阅读本书的过程中循序渐进，先学习软件功能和操作部分，再练习实例应用的内容。对于本书有关软件使用的内容，建议在软件中进行具体的操作，加深对于软件使用的理解和认知。本书应用实例的仿真模型数据及其他相关资料，可在机械工业出版社官方网站（www.cmpbook.com）本书介绍页面下免费下载。

Mentor Graphics 公司力推 FloEFD 软件作为通用计算流体动力学软件，本书的出版得到了 Mentor Graphics 公司的大力支持。其中市场部门的童燕萍和 Keith Hanna 对于本书的出版提供了诸多帮助和建议，作者在此深表感谢。同时本书的出版也受益于行业内

多位资深专家的帮助，正是他们的倾情付出，本书实例部分才得以顺利完成撰写。上海亚明照明有限公司的邹龙生为第 11 章提供了诸多写作材料和建议；飞利浦（中国）投资有限公司的郑臻轶对于第 12 章的撰写提供了诸多有益的建议；上海小糸车灯有限公司的王宽对于第 13 章的撰写给出了许多见解和指导；泛亚汽车技术中心有限公司的陆平对于第 14 章的撰写给出了许多见解和指导。最后作者想感谢自己的家人，正是他们的鼓励和支持，使作者能够全身心地投身于本书的撰写中。

由于本书从撰写到最终出版的时间较为紧促，加之 FloEFD 软件涉及的背景原理和行业应用比较宽泛，书中错误在所难免，作者愿与每一位读者进行交流和探讨，正如古人云“奇文共欣赏，疑义相与析”。

李 波 陈文鑫

2015 年 7 月

目 录

前言	
第 1 章 计算流体力学概论	1
1.1 计算流体力学的基本概念	1
1.2 计算流体力学的优点	2
1.3 计算流体力学的发展过程	2
1.4 计算流体力学的应用领域	3
1.5 计算流体力学商业软件介绍	4
第 2 章 FloEFD 软件介绍	5
2.1 FloEFD 的工程应用背景	5
2.2 FloEFD 研发背景和历史	6
2.3 FloEFD 的特点和优势	6
2.4 FloEFD 项目文件夹的文件结构	9
2.5 FloEFD 软件安装和许可证配置	10
2.5.1 FloEFD 支持的操作系统和计算机硬件配置	10
2.5.2 FloEFD 14.1 软件的安装	11
2.5.3 许可证管理器的安装	14
2.5.4 FloEFD 14.1 单机版或网络浮动版服务器许可证的安装	15
2.5.5 FloEFD 14.1 网络浮动版客户端许可证的获取	18
第 3 章 几何模型准备	19
3.1 背景	19
3.2 FloEFD 仿真模型数据要求	19
3.3 原始 MCAD 数据准备	20
3.4 中间格式 MCAD 数据准备	21
3.5 模型检查 (Check Geometry) 功能应用	23
3.6 小结	25
第 4 章 仿真分析基础	27
4.1 向导设置	27
4.2 计算域	29
4.2.1 背景	29
4.2.2 FloEFD 中计算域设置	29
4.3 边界条件	31

4.3.1	背景	31
4.3.2	FloEFD 中边界条件设置	31
4.3.3	FloEFD 中边界条件设置实例	33
4.4	流体子域	35
4.4.1	背景	35
4.4.2	FloEFD 中流体子域设置	35
4.5	多孔介质	37
4.5.1	背景	37
4.5.2	工程数据库多孔介质	38
4.5.3	多孔介质设置	40
4.6	辐射面	41
4.6.1	背景	41
4.6.2	工程数据库的辐射面	43
4.6.3	辐射面设置	44
4.7	辐射源	45
4.7.1	背景	45
4.7.2	辐射源设置	46
4.7.3	辐射源设置实例	47
4.8	固体材料	48
4.8.1	背景	48
4.8.2	工程数据库固体材料	49
4.8.3	固体材料设置	51
4.9	目标	52
4.9.1	背景	52
4.9.2	目标设置	52
4.9.3	其他	53
4.10	热源	55
4.10.1	表面热源	55
4.10.2	体积热源	56
4.10.3	体积热源设置实例	56
第5章	元件简化模型	58
5.1	风扇	58
5.1.1	背景	58
5.1.2	工程数据库风扇	60
5.1.3	风扇模型	63
5.1.4	轴流风扇建模实例	63
5.2	接触热阻	65
5.2.1	背景	65
5.2.2	工程数据库接触热阻	66

5.2.3 接触热阻模型	66
5.2.4 接触热阻建模实例	67
5.3 风扇散热器	69
5.3.1 背景	69
5.3.2 散热器工程数据库	69
5.3.3 风扇散热器模型	70
5.4 热电制冷器	71
5.4.1 背景	71
5.4.2 热电制冷器工程数据库	71
5.4.3 热电制冷器模型	72
5.4.4 热电制冷器建模实例	72
5.5 打孔板	74
5.5.1 背景	74
5.5.2 打孔板工程数据库	74
5.5.3 打孔板模型	76
5.5.4 打孔板建模实例	77
5.6 热连接	79
5.6.1 背景	79
5.6.2 热连接模型	79
第6章 网格基础与操作	80
6.1 CFD 软件网格简介	80
6.2 FloEFD 网格基础	81
6.3 FloEFD 网格设置	82
6.3.1 自动网格设置	82
6.3.2 手动网格设置	84
6.3.3 局部初始网格设置	90
6.3.4 自适应网格设置	91
6.4 小结	91
第7章 求解计算和监控	93
7.1 计算控制选项	93
7.2 运行计算设置	95
7.3 求解计算窗口	96
第8章 结果后处理和操作	98
8.1 网格显示	98
8.2 切面云图	100
8.3 表面云图	104
8.4 等值面云图	106
8.5 流动迹线	107
8.6 粒子研究	109

8.7	点参数	109
8.8	表面参数	110
8.9	体积参数	111
8.10	XY图	113
8.11	目标图	114
8.12	报告	115
第9章	参数化研究	119
9.1	参数化研究介绍	119
9.1.1	参数化研究的作用	119
9.1.2	参数化研究界面	119
9.1.3	参数化研究使用流程	119
9.2	方案评估 (What If)	120
9.3	目标优化 (Goal Optimization)	122
9.4	参数化研究实例	124
9.4.1	方案评估实例	124
9.4.2	目标优化实例	127
第10章	FloEFD 软件模块	130
10.1	Electronics Cooling 模块	130
10.1.1	介绍	130
10.1.2	焦耳发热	130
10.1.3	元件简化模型	130
10.1.4	电子行业数据库	132
10.2	LED 模块	134
10.2.1	介绍	134
10.2.2	仿真功能	135
10.2.3	元件简化模型	135
10.2.4	LED 行业数据库	136
10.3	HVAC 模块	138
10.3.1	介绍	138
10.3.2	仿真功能	139
10.3.3	舒适性结果参数	139
10.3.4	HVAC 行业数据库	139
10.4	Advanced 模块	140
10.4.1	介绍	140
10.4.2	仿真功能	140
第11章	LED 工矿灯热仿真实例	141
11.1	LED 工矿灯背景	141
11.2	LED 工矿灯热设计目标	141
11.3	LED 工矿灯冷却架构	142

11.4 LED 工矿灯热仿真	143
11.4.1 建立模型	143
11.4.2 求解计算	151
11.4.3 仿真结果分析	152
11.5 小结	153
第 12 章 LED 射灯热仿真实例	154
12.1 LED 射灯背景	154
12.2 LED 射灯热设计目标	155
12.3 LED 射灯冷却架构	156
12.4 LED 射灯热仿真	157
12.4.1 建立模型	157
12.4.2 求解计算	171
12.4.3 仿真结果分析	171
12.4.4 优化设计	177
12.5 小结	180
第 13 章 卤素车灯热仿真实例	181
13.1 车灯背景	181
13.2 车灯热设计目标	182
13.3 卤素车灯热交换架构	182
13.3.1 热辐射背景	182
13.3.2 卤素车灯热交换	184
13.4 卤素车灯热仿真	185
13.4.1 建立模型	185
13.4.2 求解计算	207
13.4.3 仿真结果分析	208
13.5 小结	210
第 14 章 汽车空调箱线性度仿真	211
14.1 汽车空调箱背景及简介	211
14.2 汽车空调箱温度控制线性度设计目标	213
14.3 汽车空调箱温度控制线性度设计关键参数	214
14.4 汽车空调箱温度控制线性度仿真实例	214
14.4.1 汽车空调箱温度控制线性度仿真背景	214
14.4.2 加热器热和流动特性仿真	215
14.4.3 空调箱线性度仿真	226
14.5 小结	242
参考文献	243

第 1 章

计算流体力学概论

1.1 计算流体力学的基本概念

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是 20 世纪流体力学领域的重要技术之一。它以电子计算机为工具, 应用各种离散化的数学方法, 对流体力学的各类问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究, 以解决各种实际问题。

为了求解描述实际流体运动物理场的偏微分方程组, 计算流体力学最基本的出发点是考虑如何把连续流体在计算机上用离散的方式来处理。一个方法是把空间区域离散成小的控制单元, 以在整个计算空间形成立体网格或者节点, 然后应用合适的算法来针对这些网格或节点求解相应的物理方程。根据求解问题的特点以及所应用的计算方法, 形成的网格可以是规则的, 也可以是不规则的。对于一些复杂问题, 如动态流动模拟等, 复杂算法还可以生成随时间或物理量变化的动态调整的网格。通常把网格的划分这一过程叫作 CFD 的前处理。

常见的离散化方法包括有限体积法、有限元法、有限差分法、边界元法等。其中有限体积法也称之为有限容积法, 是最经典或者说标准的方法, 在商用软件中最为常见。本书介绍的 FloEFD 软件也是使用这一方法。在有限体积法中, 控制方程在离散的控制体积上求解, 普遍认为这一方法更适用于流体运动的特性。而其他几种离散方法则适用于其他一些场合, 如有限元法较多用于固体结构的分析。

任何流体运动的规律都是以质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律为基础的。这些基本定律可由数学方程组来描述, 计算流体力学可以看作是在流动基本方程控制下对流体的数值仿真模拟。对于应用于网格之上的流体运动控制方程最常用的是 N-S 方程组。该方程组以克劳德-路易·纳维 (Claude-Louis Navier) 和乔治·盖伯利尔·斯托克斯 (George Gabriel Stokes) 命名, 是一组描述像液体和空气这样连续流动介质的方程。对于一些复杂问题, 如燃烧、磁流体的运动等, 除基本的守恒方程外, 还会加入其他的化学、电磁学等方程。通过对控制方程组的求解, 获得模型各物理量在空间及时间上的分布状况, 从而实现仿真的目的。这一过程我们称之为 CFD 的计算求解。

通过上述求解后得到的结果是离散后各网格内部 (或节点上) 的数值, 这样的结果并不直观, 难以为一般工程技术人员或其他相关人员理解。因此将求解结果的速度场、温度场或压力场等表示出来就成了 CFD 技术应用的重要组成部分。通常把这部分工作称为 CFD 后处理。CFD 后处理软件或模块通过计算机图形学等技术, 可以将我们所求解的速度场和温度场等形象、直观地表示出来, 产生速度分布矢量图、温度分布云图等。通常用矢量箭头的

大小表示速度大小，云图颜色的暖冷表示温度或浓度、压力等物理量的高低。CFD 的后处理不仅能显示静态的速度场、温度场等图片，而且能显示流场的流线或迹线等动画，非常形象生动。

概括起来，计算流体动力学以理论流体力学和计算数学为基础，是这两门学科的交叉学科，主要研究把描述流体运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程，建立在计算机上求解的算法，并将计算结果以便于人们理解的方式展现出来。

1.2 计算流体动力学的优点

计算流体动力学的基本特征是数值模拟和计算机实验，它从基本物理定律出发，在很大程度上替代了耗资巨大的流体动力学实验设备，在科学研究和工程技术中产生巨大的影响。由于流体运动的复杂性，无论是传统的分析方法还是实验方法都有较大的限制，既无法求得分析解，也因费用高昂而无力进行实验确定，而 CFD 方法具有成本低和能模拟较复杂或较理想过程等优点。经过一定考核的 CFD 软件可以拓宽实验研究的范围，减少成本高昂的实验工作量。在给定的参数下用计算机对现象进行一次数值模拟相当于进行一次数值实验，历史上也曾有过首先由 CFD 数值模拟发现新现象而后由实验予以证实的例子。

CFD 软件一般都能仿真分析多种物理模型，如定常和非定常流动、层流、湍流、不可压缩和可压缩流动、传热、化学反应等。对每一种物理问题的流动特点，都有适合它的数值解法，用户可以对计算模型、控制参数等进行针对性地选择和设置。很多 CFD 软件之间可以方便地进行数值交换，并采用统一的前、后处理工具，这就省却了科研及工程工作者在计算机方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动，而可以将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索和工程问题的实际解决方案上。

以风洞实验为例，相对于传统的风洞实验，CFD 数值模拟至少具有三个方面的优点：首先是节约时间，CFD 可以通过计算机快速的计算能力与超大的存储技术，建立虚拟的流场模型并进行流体的动力学仿真，从而节省了风洞实验从设计到建造，再到测试的漫长时间，且避免了物理结构变动费时的缺点；其次是节省成本，CFD 仅有的投入成本是计算机设备的购买、维护以及仿真软件的相关费用，无须像风洞那样进行物理设施的购买与安装，也不需要专门用于实验的场地，所以相对物理实验来说，CFD 技术投入的费用低很多；再次就是操作安全，由于 CFD 技术使实验的全程可以在计算机上进行模拟，不需要人与物身处高速流动的危险环境，所以相对真实的风洞实验安全性得到大幅度提高。

1.3 计算流体动力学的发展过程

计算流体动力学作为流体力学的一个分支产生于第二次世界大战前后，在 20 世纪 60 年代左右逐渐形成了一门独立的科学。总的来说，随着计算机技术及数值计算方法的发展，可以将其划分为三个阶段。

初始阶段（1965 ~ 1974 年）：这期间的主要研究内容是解决计算流体动力学中的一些基本理论问题，如模型方程、数值方法、网格划分、程序编写与实现等，并就数值结果与大量传统的流体力学实验结果及精确解进行比较，以确定数值预测方法的可靠性、精确性及影响

规律。同时为了解决工程上具有复杂几何区域内的流动问题，人们开始研究网格的变换问题，如 Thompson、Thams 和 Mastin 提出了采用微分方程来根据流动区域的形状生成适体坐标系，从而使计算流体动力学对不规则的几何流动区域有了较强的适应性，逐渐在 CFD 中形成了专门的研究领域（即网格形成技术）。

工业应用阶段（1975~1984年）：随着数值预测、原理、方法的不断完善，关键的问题是如何得到工业界的认可，如何在工业设计中得到应用。因此，该阶段的主要研究内容是探讨 CFD 在解决实际工程问题中的可行性、可靠性及工业化推广应用。同时，CFD 技术开始向各种以流动为基础的工程问题方向发展，如气固、液固多相流、非牛顿流、化学反应流、煤粉燃烧等。但是，这些研究都需要建立在具有非常专业的研究团队的基础上，软件没有互换性，自己开发，自己使用。新使用的人通常需要花相当大的精力去阅读前人开发的程序，理解程序设计意图，改进和使用。1977年 Spalding 等开发的用于预测二维边界层的迁移现象的 GENMIX 程序被公开。其后，他们首先意识到公开计算源程序很难保护自己的知识产权。因此，在 1981 年组建的 CHAM 公司将包装后的计算流体动力学软件（PHOENICS）正式投放市场，开创了 CFD 商业软件的先河。但是，在当时该软件使用起来比较困难，软件的推广并没有达到预期的效果。20 世纪 80 年代初期，随着我国与国外交流的发展，中国科学院、部分高校开始兴起 CFD 的研究热潮。

快速发展阶段（1984 年至今）：CFD 在工程设计中的应用以及应用效果的研究取得了丰硕的成果，并且在学术界得到了充分的认可。同时 Spalding 领导的 CHAM 公司在发达国家的工业界进行了大量的推广工作，Patankar 也在美国工程师协会的协助下，举行了大范围的培训，旨在推广应用 CFD 技术。然而，工业界并没有表现出太多的热情。1985 年的第四届国际计算流体力学会议上，Spalding 作了 CFD 技术在工业设计中应用前景的专题报告。在该报告中，他将工程中常见的流动、传热、化学反应等过程分为十大类问题，并指出 CFD 技术都有能力加以解决。工业界对 CFD 不感兴趣，是因为软件的通用性能不好，使用困难。如何在 CFD 的基础研究与工程开发设计研究之间建立一座桥梁，如何将研究成果为高级工程设计技术人员所掌握，并最大限度地应用于工程咨询、工程开发与设计研究，这正是本时期应用基础研究所追求的目标。此后，随着计算机图形学、计算机微机技术的快速进步，CFD 的前后处理软件得到了迅速发展。

CFD 作为一门从 20 世纪发展起来的新兴学科，发展速度之快、应用之广，超出了人们的预期。虽然，目前仍然存在着很多理论上、技术上、物理模型上、计算应用方面等有待解决的难题，但是它已经取得了巨大的进展，成为流体力学、传热学和空气动力学等相关领域研究和设计的主要手段。相信随着 CFD 和计算机技术的进一步发展，CFD 在各个领域的影响也越来越大，由此会推动采用 CFD 技术的相关领域的发展进步。

1.4 计算流体动力学的应用领域

目前，计算流体动力学已经在许多工程领域得到广泛的应用，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。其也由最初应用的航空航天领域扩展至气象、船舶、汽车设计、水利、建筑、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体及电子设备设计、暖通空调工程等诸多工程领域。

以我们日常生活中接触的建筑暖通空调工程领域为例，CFD 在这其中扮演着越来越重要的角色，至少可以帮助解决以下三个方面的问题：首先是气流组织设计，通风空调空间的气流组织直接影响到其通风空调效果，借助 CFD 软件可以预测空间内的温度、湿度和压力等参数的分布详细信息，从而指导空调系统的设计。其次是环境分析，建筑外环境对建筑内部居住者的生活有着重要的影响，如建筑小区二次风、小区热环境等问题日益受到人们的关注。采用 CFD 可以方便地对建筑外环境进行仿真分析，从而设计出合理的建筑风环境。而且，通过仿真建筑外环境风的流动情况，还可以进一步指导建筑内的自然通风设计等。再次是性能的研究，暖通空调工程的许多设备（如风机、蓄水槽、空调器等）都是通过流体工质的流动而工作的，流动情况对设备性能有着重要的影响。通过 CFD 模拟计算设备内部的流体流动情况，可以研究设备换热和流动性能，从而改进设计使其更高效工作，降低建筑能耗，节省运行费用。

1.5 计算流体动力学商业软件介绍

早期的计算流体动力学软件往往分为三个相对独立的模块，即用于网格划分和建模的前处理模块，用于数值计算的 CFD 求解器和用于结果展示的后处理模块。如应用比较普遍的前处理模块有 Gambit、ICEMCFD 等；通用 CFD 求解器有 Fluent、CFX、Star-CD 等；后处理模块有 Tecplot、CFD-POST 等。

为了数据交换的便捷性和工程应用的方便性，现在很多的 CFD 软件则趋向于将前处理、求解器和后处理整合在一个统一的界面内。更有像本书介绍的 FloEFD 软件将功能齐全的通用 CFD 工具嵌入主流的 MCAD（Mechanical Computer Aided Design，计算机辅助机械设计）软件系统内。由此，三维几何模型设计与 CFD 仿真分析同步进行，网格的创建、模型参数设定、计算求解，直至最终的结果展示和产品方案设计优化都在同一个环境内进行，大幅减少了数据传输转换的工作量，缩短了产品研发测试的生命周期。

除了通用的计算流体力学软件外，还有一些软件专门为某些行业的特殊应用进行了设计，极大地减少了建模仿真的时间。例如，对于电子散热行业常用的 FloTHERM 软件，因其集成了大量的电子设备器件模型（如风扇、IC 芯片、电路板等）和材料参数，软件使用者可以快速地建立复杂的电子设备系统，在最短的时间内完成工程项目的需求。又如被广泛应用于建筑通风设计、环境分析的专业软件 FloVENT，因其拥有创建智能模型、支持 MCAD 软件数据导入、针对室内空气质量独特的后处理计算等优点，可以让软件使用者快速建立复杂模型并很好地展示该行业内特有的一些计算参数，因此受到很多暖通空调设备工程师的青睐。

随着计算流体动力学技术的不断进步和计算机硬件的快速发展，商用计算流体动力学软件也将适用于更多的工程，并且在产品研发过程中发挥其更大的作用。

第 2 章

FloEFD 软件介绍

2.1 FloEFD 的工程应用背景

FloEFD 是无缝集成于主流三维 MCAD 软件中的高度工程化的通用流体流动与传热分析软件。它基于当今主流 CFD 软件都广泛采用的有限体积法 (FVM) 开发, 并且被完全嵌入 Creo、CATIA、Solidworks 和 NX 等主流三维 MCAD 软件中。其主要应用于以下领域:

- 1) 照明行业。
- 2) 电子散热行业。
- 3) 汽车行业。
- 4) 军工/航天航空行业。
- 5) 机械行业。
- 6) 医疗器械行业。
- 7) 能源、化工行业。
- 8) 制冷/空调/暖通行业。
- 9) 风扇/泵/压缩机等透平机械行业。
- 10) 阀门、管道等流体控制设备行业。

FloEFD 具有丰富的流体流动和传热学物理模型, 可用于求解以下众多的工程实际问题:

- 1) 外流/内流。
- 2) 多流域 (拥有独自流体参数)。
- 3) 不可压缩/可压缩黏性流动。
- 4) 不可压缩/可压缩气体黏性流动, 包括亚音速、近音速、超音速、超高音速。
- 5) 层流/湍流/过渡区流体流动。
- 6) 多组分分析 (甚至可达数十种不相关组分)。
- 7) 非牛顿流体流动。
- 8) 蒸汽的分析。
- 9) 相对湿度的分析。
- 10) 空化现象。
- 11) 耦合换热 (流体与固体), 导热与对流。
- 12) 强迫对流/自然对流/混合对流。
- 13) 太阳辐射和红外辐射分析 (蒙特卡罗、离散坐标和离散传播模型)。

- 14) 瞬态问题。
- 15) 旋转机械分析。

2.2 FloEFD 研发背景和历史

1999 年以前的 CFD 软件还具有非常浓厚的科学代码风格，并且需要高性能的计算机资源作为基础，对于软件使用者而言也有很高的要求。如何选择合适的物理模型、创建可靠的网格以及求解收敛的控制都限制了 CFD 软件只有少数人能熟练使用。当时 CFD 软件的应用场合也仅仅局限于航空、汽车和电力能源等少数几个可以负担 CFD 软件高昂使用费用的高科技行业。FloEFD 研发的目的是为了让更多的人可以通过 CFD 软件仿真分析而受益。FloEFD 要达成的目标是，将 CFD 软件引入通用机械、液压、旋转机械、电子产品、暖通、消费品等行业，将其贯穿至产品概念设计、研发和优化设计的各个阶段。易于使用、功能强大、高效、结果精度高和合理的价格是 FloEFD 为了达成这一目标而所应具备的特性。有别于其他的商业 CFD 软件，FloEFD 被嵌入主流的 MCAD 软件中，为软件的易用性和高效性提供了坚实的基础。

1999 年德国 Nika 公司成功地基于俄罗斯热工程科学研究院的 AeroShape 3D 开发了完全嵌入到 MCAD 软件中的 FloWorks 99。2006 年 Nika 公司被英国热仿真软件公司 FLOMERICS 收购，之后 FloWorks 99 更名为 EFD。2008 年美国 EDA 软件公司 Mentor Graphics 公司收购 FLOMERICS。次年 Mentor Graphics 公司将 EFD 更名为 FloEFD，并沿用至今。

2.3 FloEFD 的特点和优势

FloEFD 完全嵌入主流 MCAD 软件中，对于 Creo、CATIA、Solidworks 和 NX 等主流三维 MCAD 软件的模型数据而言，没有数据的转化过程。同时，FloEFD 软件可以自动识别流体流动区域，避免建立流动区域模型的工作。如图 2-1 所示 FloEFD 软件可以自动识别发动机水套内部流体流动的区域。

FloEFD 支持全自动网格划分和基于仿真结果的自适应网格划分。如图 2-2 所示 FloEFD 会根据阀门几何模型的不同和自动网格划分的等级自动创建网格。由此可以降低软件使用者对于 CFD 专业知识背景的要求，提升仿真分析的效率。

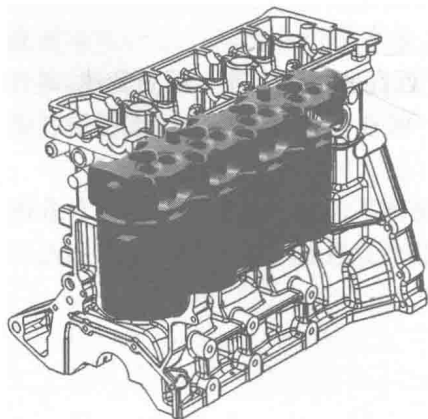


图 2-1 发动机水套

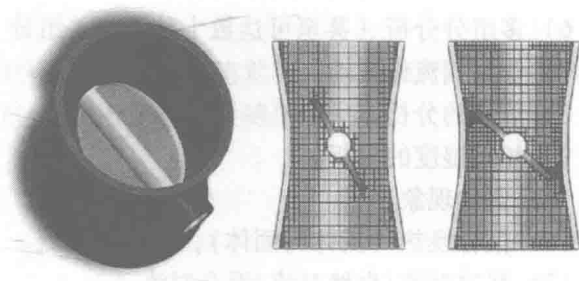


图 2-2 自动划分的阀门网格

FloEFD 具有层流、过渡流和湍流自动识别和求解能力。FloEFD 软件可以自动识别流体流动区域的流体流态。降低软件使用者对于 CFD 专业知识背景的要求和提升仿真分析的效率。图 2-3 所示为 FloEFD 在整个流动范围内流体流动阻力系数仿真结果与实验数据的对比。

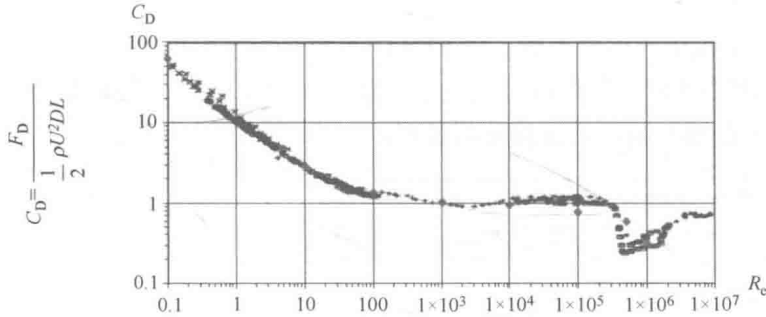


图 2-3 FloEFD 仿真与实验的流体流阻系数对比

FloEFD 中采用的修正壁面函数将网格和湍流模型联系在一起。其可以在近壁面没有精细网格的条件下，获得足够的工程求解结果精度。图 2-4 所示为 FloEFD 中圆柱绕流仿真结果与实验的对比。

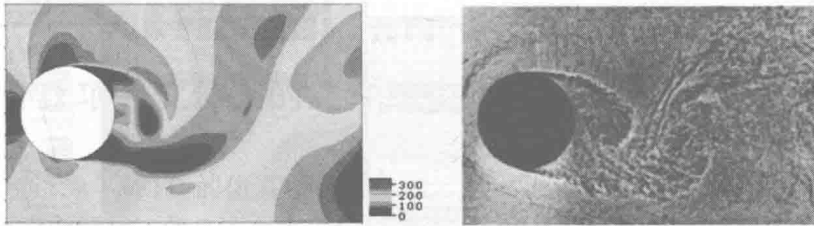


图 2-4 FloEFD 仿真与实验的圆柱绕流结果对比

FloEFD 具有自动求解收敛技术，与传统 CFD 软件通过残差曲线确定求解是否收敛不同，FloEFD 基于用户设置的目标进行收敛判定。由此，可以保证用户所关注区域和参数的准确性，同时也保证了收敛的可靠性。图 2-5 所示为 FloEFD 软件的求解收敛监控窗口。

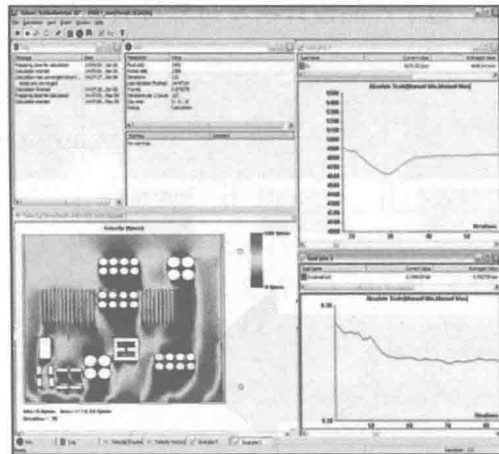


图 2-5 FloEFD 求解收敛监控窗口