

李 辉 申胜男 主编

流体力学仿真软件ANSYS Fluent 在工程中的应用



科学出版社

流体力学仿真软件 ANSYS Fluent 在工程中的应用

李 辉 申胜男 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面介绍了流体力学仿真软件 ANSYS Fluent 的应用方法, 详细介绍了该软件应用于流体分析领域的基本操作方法和工程应用实例。全书共 8 章, 汇集了科研工作中的具体案例, 对高压气吹除压载水舱工作过程、LED 芯片翅片式热沉的散热性能、金属 3D 打印机换气系统流场、高过滤性口罩佩戴过程中水蒸气冷凝过程、硬盘内部流场性能及颗粒运动轨迹、硬盘寻道过程内部流场、加湿器和呼吸作用对房间温湿度的影响、基于一维与三维耦合方法的管网系统吹除过程等进行了仿真分析。

本书内容翔实、全面, 特别适合初学者阅读, 可作为流体工程、水利、海洋、动力、环境等专业的本科生和研究生教材, 也可供上述领域的工程技术人员和科研人员以及从事 CFD 模拟的相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学仿真软件 ANSYS Fluent 在工程中的应用 / 李辉, 申胜男主编.
—北京: 科学出版社, 2019.3
ISBN 978-7-03-060225-1

I. ①流… II. ①李… ②申… III. ①工程力学-流体力学-有限元分析-应用软件-高等学校-教材 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 292281 号

责任编辑: 裴 育 纪四稳 / 责任校对: 王萌萌
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 18 3/4

字数: 378 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是研究流体流动规律、流体与固体相互作用、燃烧等化学反应以及相变等过程的一门学科,而它在与流动现象有关的学科和工业领域的应用,依赖于计算数学和计算机软硬件环境。ANSYS Fluent 是一款功能强大的 CFD 工程分析软件,具有丰富的物理模型、先进的数值求解方法以及强大的前后处理功能,能够为流体、热传递以及化学反应等工程问题提供重要的参考。

本书共 8 章,主要介绍实际工程应用案例,内容丰富,讲解详细,由浅入深。依据实际工程应用案例,对 CFD 软件的计算模型、求解方法和前后处理功能进行详细的介绍。第 1 章通过高压气吹除压载水舱系统的排水性能和流致噪声仿真分析案例,结合实际工程应用对 ANSYS Fluent 的湍流模型、VOF 多相流模型和噪声模型进行详细的讲解分析;第 2 章通过自然对流下大功率 LED 热沉散热性能仿真分析案例,介绍 ANSYS Fluent 的热传递分析功能、自然对流问题的设置和流-固-热多场耦合问题的计算方法;第 3 章通过对金属 3D 打印机换气系统流场的仿真分析,介绍 ANSYS Fluent 湍流模型的应用,以及 Interface 的设置方法;第 4 章通过 N95 口罩佩戴过程中水蒸气冷凝仿真分析案例,介绍 ICEM 前处理软件网格划分过程,结合欧拉多相流模型和用户自定义函数(user defined function, UDF)功能,展示 ANSYS Fluent 在相变仿真方面的应用;第 5 章通过对考虑吸附条件的硬盘内部颗粒运动轨迹的仿真分析,介绍 ANSYS Fluent 离散相模型(discrete phase model, DPM)的应用;第 6 章通过对硬盘寻道过程内部流场的仿真分析,介绍 ANSYS Fluent 动网格旋转运动的设置方法;第 7 章通过加湿器和呼吸作用对房间温湿度影响的仿真分析案例,介绍 ANSYS Workbench 的 Mesh 前处理模块网格划分过程,结合欧拉多相流模型和用户自定义函数功能,展示 ANSYS Fluent 在相变仿真方面的应用;第 8 章通过管网系统吹除过程的一维与三维耦合仿真分析案例,介绍一维管网系统仿真与三维 CFD 耦合方法。书中相关科研成果分别发表在 *IEEE Transactions on Magnetics*、*Thermal Science*、*Heat Transfer Research* 等国际 SCI 期刊上。

本书所使用的 ANSYS 版本为 ANSYS 16.0 和 ANSYS 17.0,涉及的组件包括网格划分软件 ICEM、数值计算软件 Fluent 和 Workbench,以及后处理软件 CFD-Post。书中还使用了网格划分软件 Gambit 2.4.6、后处理软件 Tecplot 2016、

多物理场耦合工具 MpCCI 4.4.1 和一维流体系统仿真软件 Flowmaster V7.9.0。此外,通过 UDF 编译函数自定义边界条件使用的程序开发环境是 Microsoft Visual Studio 2010。

本书内容翔实、全面,特别适合初学者阅读,每一章节的案例均有详细的操作说明,读者按照书中的操作步骤即可完成相应问题的模拟与分析,进而逐步熟练使用 ANSYS Fluent 进行流体力学仿真。

本书由武汉大学李辉教授与申胜男副教授主编,研究生张国庆、杨韵、崔福浩、黄贻苍、杨泉、朱宇文、张东起等参与编写,其中崔福浩负责第 1 章的编写,黄贻苍负责第 2 章的编写,朱宇文负责第 3 章的编写,杨泉负责第 4 章的编写,张国庆负责第 5、6 章的编写,杨韵负责第 7、8 章的编写,张东起负责全书的整理。在本书编写过程中,得到了武汉大学动力与机械学院张昊、李起凡、毛晟伟、段帅臣、王佳扬、左晨乐、姜宇扬等多位本科生的帮助,他们进行了仔细的案例验证与文字校核,在此表示感谢!

由于作者水平有限,书中疏漏或不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。读者可通过电子邮箱 li_hui@whu.edu.cn 与我们交流并获取本书的模型文件。

作 者

2018 年 6 月于武汉珞珈山

目 录

前言

第 1 章	高压气吹除压载水舱流体性能仿真分析	1
1.1	案例介绍	1
1.2	物理模型	2
1.3	网格划分	2
1.4	问题求解	19
1.5	后处理	33
第 2 章	自然对流下大功率 LED 热沉散热性能仿真分析	43
2.1	案例介绍	43
2.2	物理模型	43
2.3	网格划分	44
2.4	问题求解	68
2.5	后处理	81
第 3 章	金属 3D 打印机换气系统流场仿真分析	91
3.1	案例介绍	91
3.2	物理模型	91
3.3	网格划分	92
3.4	边界条件设置	105
3.5	问题求解	115
3.6	后处理	122
第 4 章	N95 口罩佩戴过程中水蒸气冷凝仿真分析	131
4.1	案例介绍	131
4.2	物理模型	131
4.3	网格划分	133
4.4	问题求解	139
4.5	后处理	148
第 5 章	考虑吸附条件的硬盘内部颗粒运动轨迹仿真分析	153
5.1	案例介绍	153
5.2	物理模型	154

5.3	网格划分	154
5.4	问题求解	156
5.5	后处理	173
第 6 章	硬盘寻道过程内部流场仿真分析	181
6.1	案例介绍	181
6.2	物理模型	182
6.3	问题求解	183
6.4	后处理	200
第 7 章	加湿器和呼吸作用对房间温湿度影响的仿真分析	212
7.1	案例介绍	212
7.2	物理模型	213
7.3	网格划分	214
7.4	问题求解	223
7.5	后处理	240
第 8 章	管网系统吹除过程的一维与三维耦合仿真分析	253
8.1	案例介绍	253
8.2	物理模型	254
8.3	网格划分	255
8.4	问题求解	255
8.5	后处理	275
参考文献		284
附录 A	MpCCI 4.4.1 安装教程	285

第 1 章 高压气吹除压载水舱流体性能仿真分析

1.1 案例介绍

潜艇是世界各国海军重要的武器装备,它具有隐蔽性好、机动性强的特点,被广泛应用于水下侦察和突击作战。潜艇高压气吹除压载水舱是潜艇遇险等紧急情况下最有效的挽救措施,能够使潜艇快速上浮至水面。目前,国内外学者根据计算流体力学的相关理论对高压气吹除压载水舱的过程进行了数学建模与仿真分析,研究了高压气吹除压载水舱的排水速率、压力变化、气液体积比变化等,但针对高压气吹除压载水舱工作过程中产生的剧烈气动噪声的研究还没有相关报道。随着舰艇技术的不断发展,高压空气应用于吹除压载水舱,且所采用气压不断升高,潜艇内部的气动噪声、流-固耦合作用下管道及水舱的振动噪声越来越不容忽视。在高压气吹除压载水舱系统中,输气管路及控制阀非常复杂,高压高速气流的湍流现象以及流致噪声非常明显,导致高压气吹除压载水舱工作时产生的噪声影响潜艇的技战术性能。

本章基于流体力学仿真软件 ANSYS Fluent 对高压气吹除压载水舱工作过程进行数值模拟,考虑控制阀和输气管路对压载水舱流场特性的影响,研究压载水舱内气液两相界面的变化过程和水舱排水速率的变化情况。同时,研究高压气吹除压载水舱工作时的气动噪声特性,揭示高压气吹除压载水舱工作时的湍流现象与气动噪声的关联特性。高压气吹除压载水舱流场特性及气动噪声特性仿真是典型的气液两相流问题,材料参数分别设置为可压缩理想空气和液态水。在 ANSYS Fluent 中选用多相流模型中的 VOF(volume of fraction)模型对高压气吹除过程中压载水舱中水的自由液面进行追踪,对多相流模型采用显式(explicit)求解;选用标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型求解流体控制方程;选用 Acoustics 模型中的 Ffowcs-Williams & Hawkings 声类比法求解气动噪声,声源选项为壁面偶极子。

本章将介绍一个高压气吹除压载水舱系统的排水性能和流致噪声仿真分析的案例。通过本案例的学习,读者可以掌握如何使用 Fluent 多相流模型和噪声模型。本案例中使用的计算机配置为 56 核@2.2GHz 的 CPU, 4×128GB 的内存,完整计算至 2.725s 大约需 168h。为了使读者在学习本章过程中能够快速验证模型计算的正确性,本章分别展示了计算前 4~5h 内的结果和最终结果。

1.2 物理模型

如图 1-1 所示, 潜艇高压气吹除压载水舱系统包括输气管路、电磁阀和压载水舱等部分。压载水舱的容积为 10.34m^3 、出口直径为 500mm , 输气管路长度为 8m 、直径为 32mm 。潜艇高压气吹除压载水舱系统通过电磁阀控制高压气的通断, 电磁阀阀芯的行程为 9mm , 动作时间为 $1\sim 2\text{s}$ 。

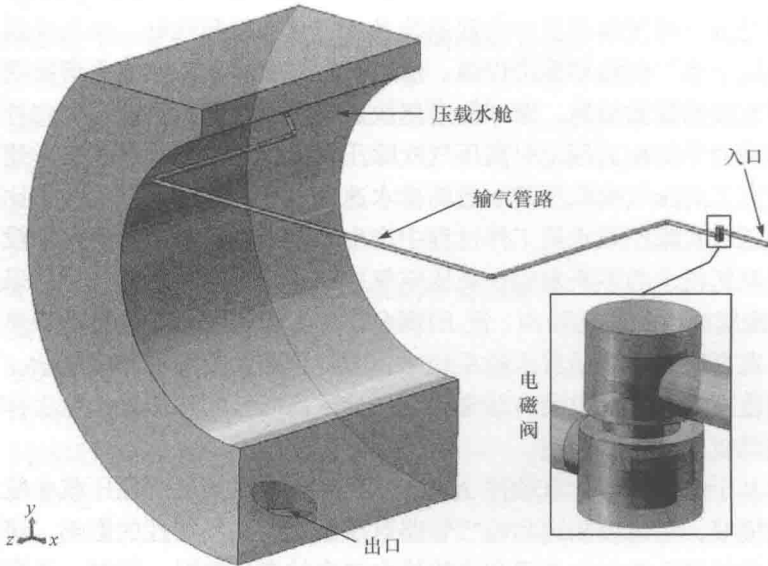


图 1-1 高压气吹除压载水舱三维模型

1.3 网格划分

本案例使用 Gambit 对三维几何模型进行网格划分, 采用 Interface 网格技术, 分别对输气管路、电磁阀和压载水舱部分进行不同尺度的网格划分。输气管路部分采用六面体结构网格, 电磁阀部分采用四面体非结构网格, 压载水舱部分采用 Interface 技术进行多次分割, 对压载水舱入口区域进行局部加密, 划分为六面体结构网格。

1. 建立几何模型

1) 打开 Gambit

双击 Gambit 快捷方式, 弹出如图 1-2 所示的对话框, 设置工作目录。

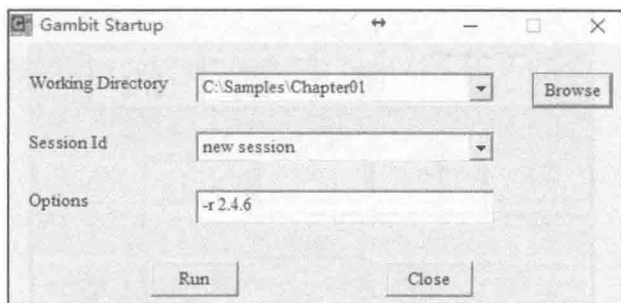


图 1-2 启动 Gambit

2) 导入几何模型

执行“File→Import→Parasolid...”命令，弹出如图 1-3(a)所示的对话框，单击“Browse...”按钮，弹出如图 1-3(b)所示的对话框，选择“C:\Samples\Chapter01\Chapter01_water_tank.x_t”文件，单击“Accept”按钮关闭 Select File 对话框。选择“Make Tolerant”复选框，单击“Accept”按钮，完成几何模型导入。

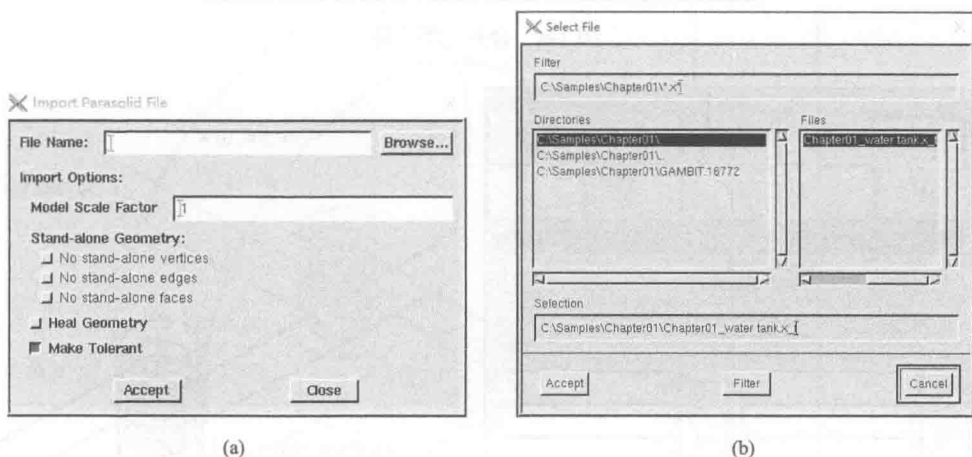


图 1-3 导入几何模型

2. 划分几何模型区域

1) 合并实体

如图 1-4 所示，执行“Operation→Geometry→Volume→Unite Real Volumes”命令，在列表中选择所有实体，单击“Apply”按钮，将模型合并为一个实体。

2) 分割实体

(1) 电磁阀区域：执行“Operation→Geometry→Vertex→Create Real Vertex”命令，建立如图 1-5 所示的 6 个点。

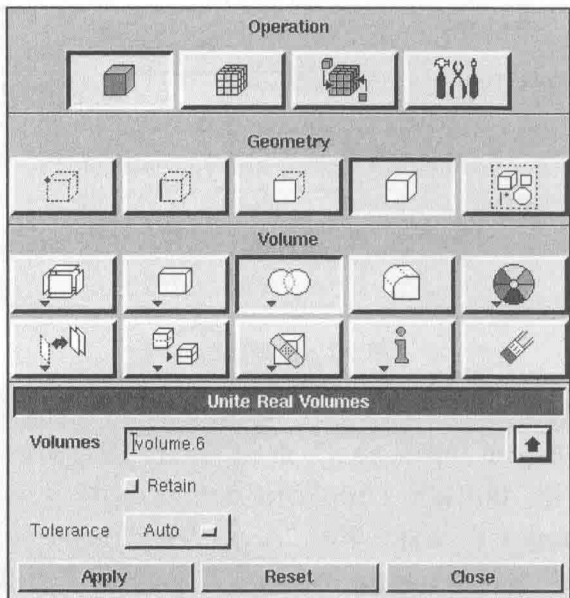


图 1-4 合并三维实体

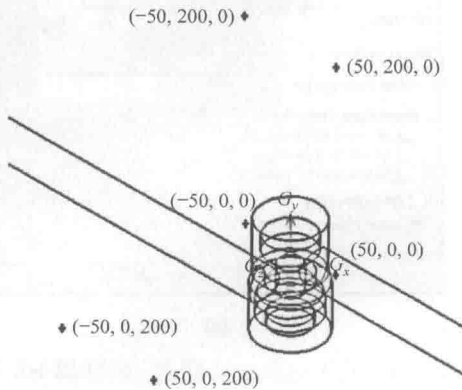
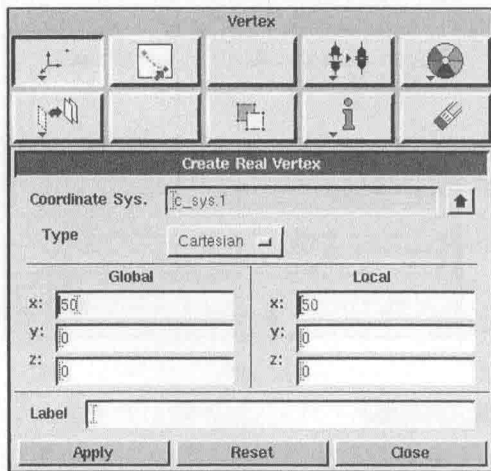


图 1-5 建立点

如图 1-6 所示，执行“Operation→Geometry→Face→Create Circular Face from Vertices”命令，建立以(50, 0, 0)为圆心、(50, 200, 0)和(50, 0, 200)为端点的圆，再建立以(-50, 0, 0)为圆心、(-50, 200, 0)和(-50, 0, 200)为端点的圆。

如图 1-7(a)所示，执行“Operation→Geometry→Volume→Split Volume”命令，在 Volume 列表中选择“volume.1”，Split With 设置为“Faces (Real)”，在 Faces

列表中选择上述所画的两个圆面“face.50、face.51”，不勾选“Connected”复选框，单击“Apply”按钮，完成实体分割，结果如图 1-7(b)所示。

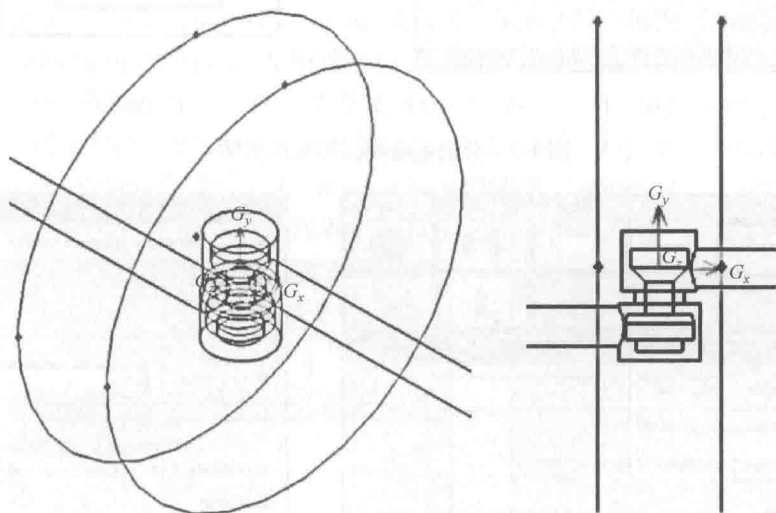
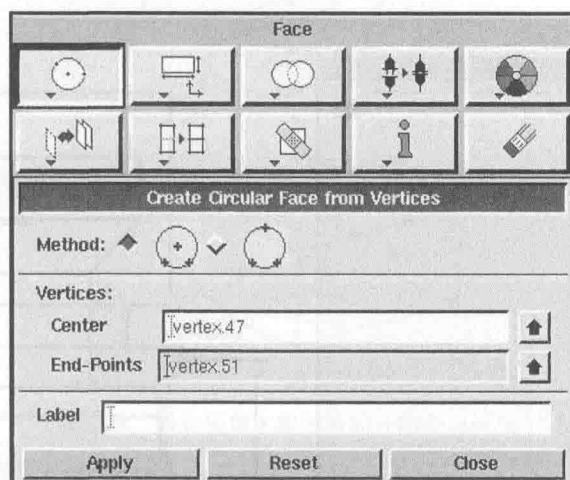
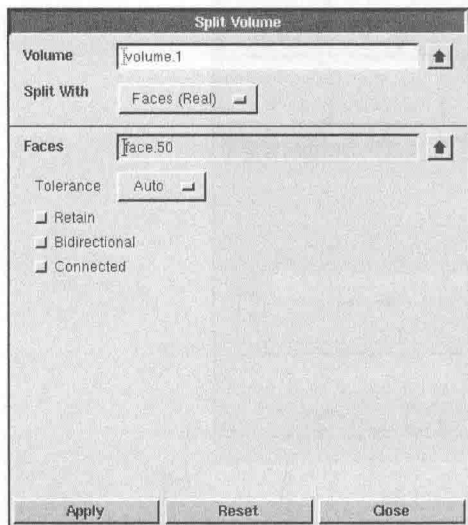


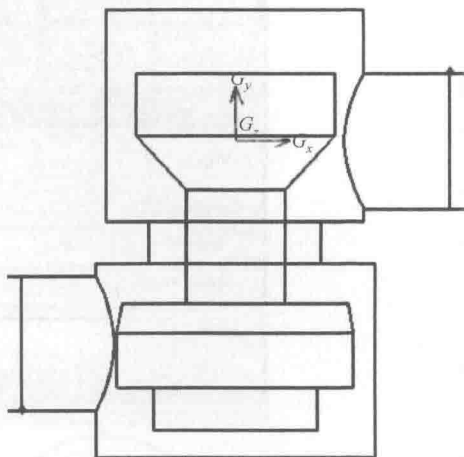
图 1-6 建立电磁阀区域的分割面

(2) 压载水舱区域：如图 1-8(a)所示，执行“Operation→Geometry→Face→Sweep Edges”命令，在 Edges 列表中选择“edge.44”，Path 设置为“Vector”，单击“Define”按钮，弹出 Vector Definition 对话框，如图所示设置，沿着 Z 轴负方向，拉伸长度为 2500，单击“Apply”按钮关闭对话框，再单击 Sweep Edges 对话框的“Apply”按钮关闭对话框，建立如图 1-8(b)所示的“分割面”。然后，执行“Operation→Geometry→Volume→Split Volume”命令，在 Volume 列表中选

择“volume.1”，Split With 设置为“Faces (Real)”，在 Faces 列表中选择上述所画的分割面“face.56”，不勾选“Connected”复选框，单击“Apply”按钮，完成实体分割。

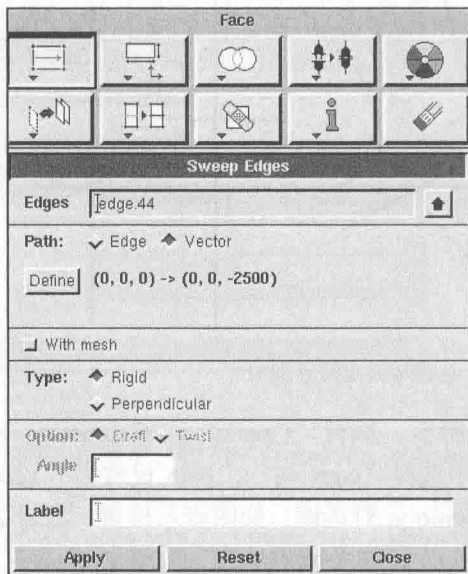


(a)

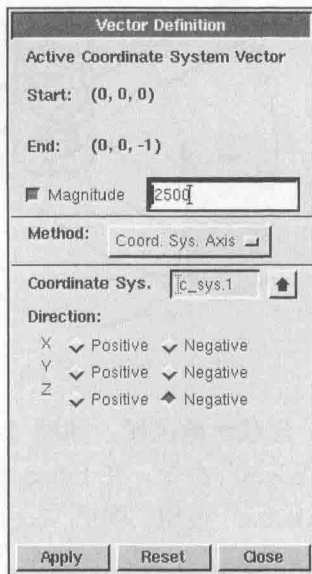


(b)

图 1-7 分割电磁阀区域几何实体



(a)



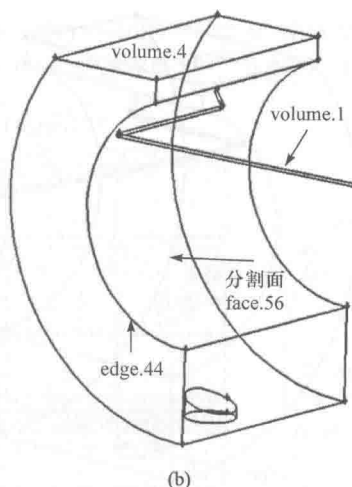
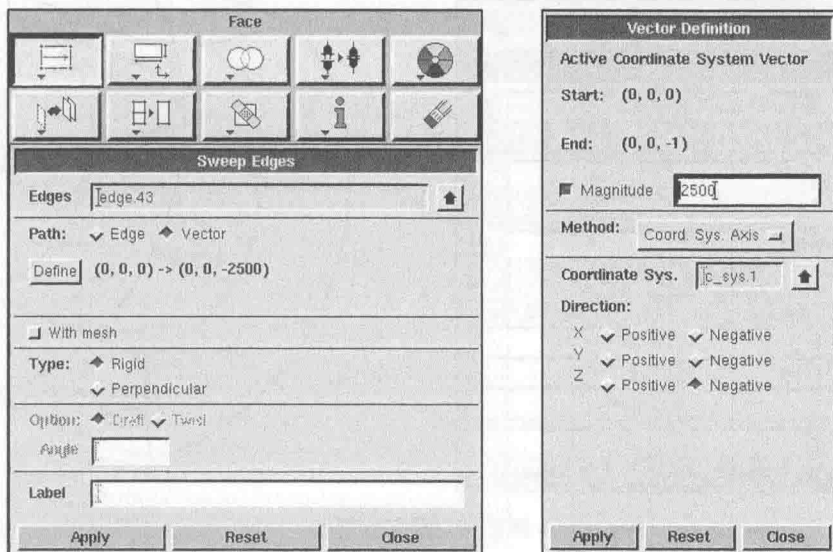
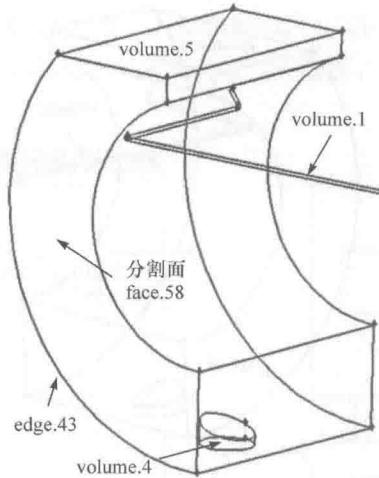


图 1-8 建立压载水舱区域的分割面 face.56

如图 1-9(a)所示, 执行“Operation→Geometry→Face→Sweep Edges”命令, 在 Edges 列表中选择“edge.43”, Path 设置为“Vector”, 单击“Define”按钮, 弹出 Vector Definition 对话框, 如图所示设置, 沿着 Z 轴负方向, 拉伸长度为 2500, 单击“Apply”按钮关闭对话框, 再单击 Sweep Edges 对话框的“Apply”按钮关闭对话框, 建立如图 1-9(b)所示的“分割面”。然后, 执行“Operation→Geometry→Volume→Split Volume”命令, 在 Volume 列表中选择“volume.4”, Split With 设置为“Faces (Real)”, 在 Faces 列表中选择上述所画的分割面“face.58”, 不勾



(a)



(b)

图 1-9 建立压载水舱区域的分割面 face.58

选“Connected”复选框，单击“Apply”按钮，完成实体分割。

执行“Operation→Geometry→Vertex→Create Vertex on Edge”命令，如图 1-10 所示，在 Edge 列表选择“edge.2”，在 U Value 文本框填入 0.85，单击“Apply”按钮，在这条边上建立分割点。同样，在“edge.43”上建立分割点。

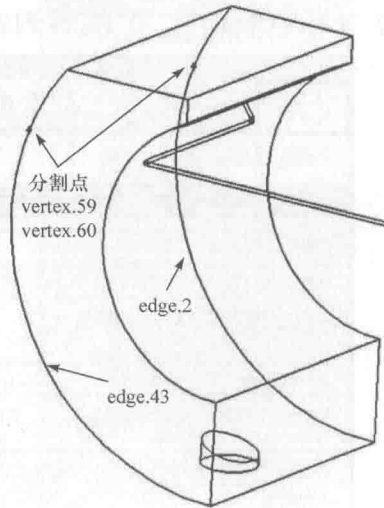
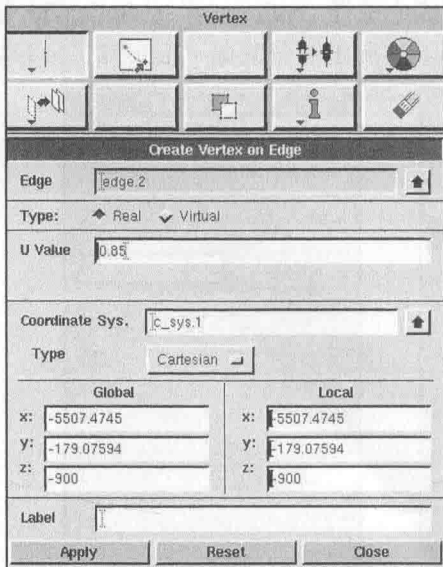


图 1-10 建立分割点

执行“Operation→Geometry→Edge→Create Straight Edge”命令，如图 1-11 所示，在 Vertices 列表中选择刚刚建立的两个分割点，即“vertex.59、vertex.60”，单击“Apply”按钮，建立分割线。

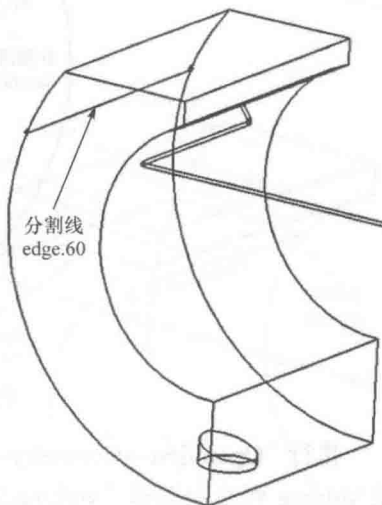
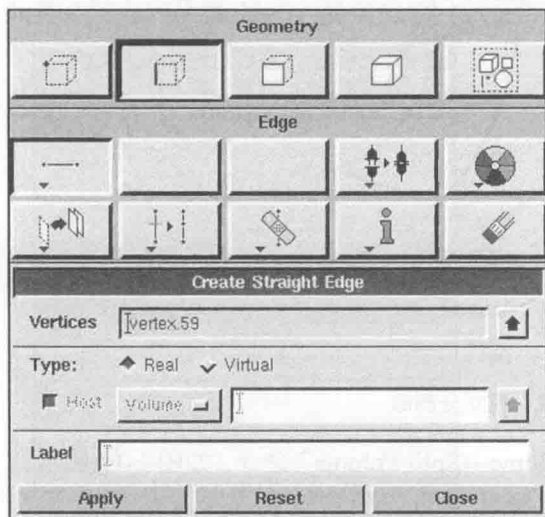
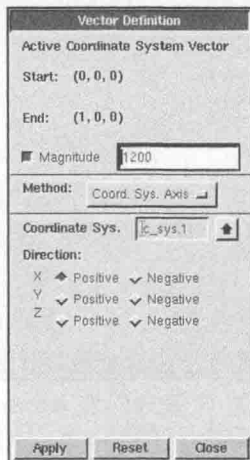
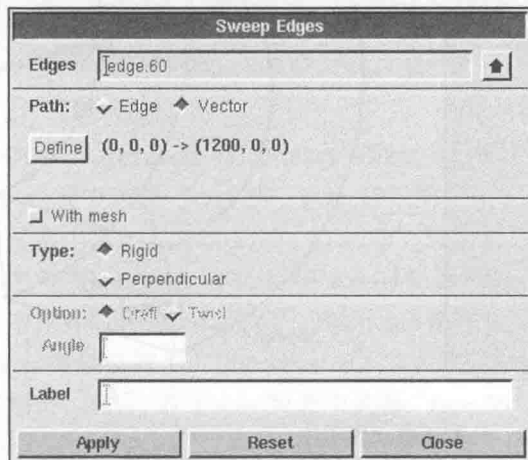


图 1-11 建立分割线

执行“Operation→Geometry→Face→Sweep Edges”命令，如图 1-12 所示，在 Edges 列表中选择刚刚建立的分割线，即“edge.60”，Path 选项设置为“Vector”，弹出 Vector Definition 对话框，如图所示设置，沿着 X 轴正方向拉伸，距离为 1200，单击“Apply”按钮关闭 Vector Definition 对话框。单击“Apply”按钮完成分割面“face.60”的绘制。



(a)

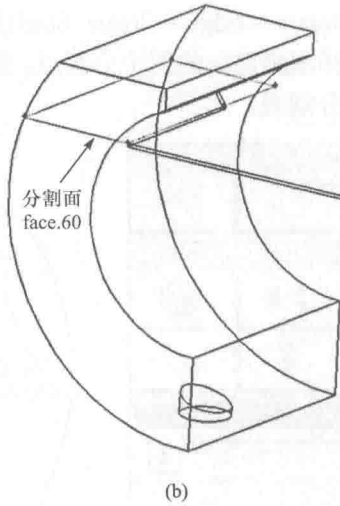


图 1-12 建立分割面

执行“Operation→Geometry→Volume→Split Volume”命令，如图 1-13 所示，在 Volume 列表中选择“volume.5”，Split With 选项设置为“Faces (Real)”，在 Faces 列表中选择刚刚建立的分割面“face.60”，不勾选“Connected”复选框，单击“Apply”按钮完成实体的设置。

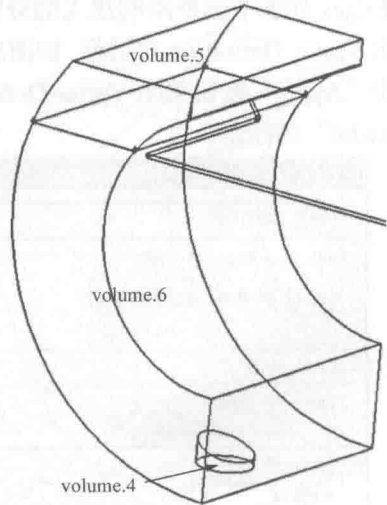
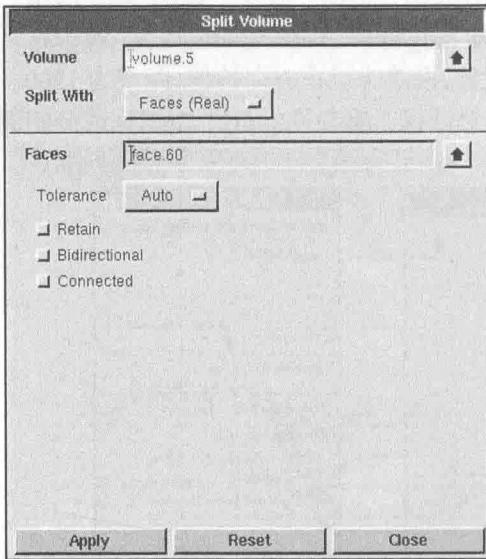


图 1-13 分割压载水舱实体