

# COMSOL Multiphysics

有限元法多物理场建模与分析

William B. J. Zimmerman  
中仿科技公司 主编



人民交通出版社  
China Communications Press

P3/7D

2007

# COMSOL Multiphysics

## 有限元法多物理场建模与分析

William B. J. Zimmerman  
中仿科技公司 主编



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

随着科学和工程的发展,使用有限元法来求偏微分方程组的数值解拥有非常广阔的前景,科研人员必须清楚地了解数学建模时的局限和困难。

本书可以帮助初学者了解如何逐步的建立一个复杂模型并检验它正确与否并介绍了进阶的分析技巧,最后通过各个方面的实例,详细演示了软件在各种问题中的应用。

作为有限元方法模拟的补充,本书使用了最新版本的 COMSOL Multiphysics,其中包含了很多新的进展,例如包括相变的多相流,等离子体动力学,电磁水动力学,微流体混合以及腐蚀。另外,对于 level set method 计算多相流最主要的进步就是确保了相位守恒。

本书理论阐述透彻,采用的教学方法新颖,适合作为理工科专业本科生和研究生的教材,也可作为上述专业的工程技术人员和教师的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析/  
中仿科技公司等主编. —北京:人民交通出版社, 2007.9  
ISBN 978-7-114-06857-7

I .C… II .中… III .①计算机辅助设计-应用软件,  
COMSOL Multiphysics-应用-地球物理场-数学模型  
②有限元法-应用-地球物理场-数学模型 IV .P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 151620 号

COMSOL Multiphysics Youxianyuanfa Duowulichang Jianmo yu Fenxi

书 名: COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析

著 作 者: William B. J. Zimmerman 中仿科技公司

责任编辑: 陈志敏 高 培

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 18.25

字 数: 396 千

版 次: 2007 年 9 月第 1 版

印 次: 2007 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-06857-7

定 价: 40.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

## 关于作者

William B. J. Zimmerman 是谢菲尔德大学化学和过程工程系生物化学动力学系统方向的教授,主要研究方向为流体动力学、反应工程和生物技术微尺度流动,著有《有限元方法过程建模和模拟》(2004)一书,并编写《微尺度流动:历史、理论和应用》(2005)一书。他早先曾编写有关“Mathematica 求解化工问题”、“化工工程建模和模拟”、“化学工程数值分析”和“FORTRAN 编程”方面的文本书籍,并于1986年开始采用有限元方法建模,已经编写了超过80本的科学和学术著作。他研究生就读于美国普林斯顿和斯坦福大学化学工程系,是环境和能源工程化工建模和模拟理论、过程流动动力学化工建模和模拟的创始人,并且在以下5个美国和英国研究机构中享有很高的声誉:

2005~2006 皇家工程学会和英国 Leverhulme Trust 资深研究员;

2005~2005 英国工程和自然科学研究委员会高级研究员;

1994~1999 皇家工程学会, Zeneca Young 学院研究员;

1991~1993 NATO 科学与工程博士后;

1988~1991 国家科学基金会委员。

# 前 言

自 2002 年,我开始培训新手如何使用 COMSOL Multiphysics(当时是 FEMLAB)进行建模,最近一次是在 2006 年 1 月的第七次培训。同时,我将我的教材从 2005 年早期的 FEMLAB 3.1 更新到 2006 年的 COMSOL Multiphysics 3.2。很多读者跟我联系,说他们买了我之前的那本书,但是很遗憾那是针对 FEMLAB 2.3 的。事实上,前一本书中包含的知识现在仍然有用,但是当一本计算机书不能跟上软件最新版本时就不再受欢迎。如果 COMSOL 版本更新,教材一定会受到版本不匹配的影响。因为 FEMLAB 版本 3“看起来和感觉”都不一样,而且现在它的名字都变了,看起来也应该升级一下我的教材了。本教材名字较以前版本有所变化,以体现现在常用的一句行话——“多物理场”。

本书希望能够适合于所有 COMSOL Multiphysics 的初学者,而且也应该适合于下一个版本 3.3,但是与化学工程师更相关。我们有力学、电学和系统控制工程师,应用数学家、物理学家、化学家和医学研究者,也有工业研究者和项目工程师。我想这本书从广度上讲能够适合各种建模初学者。

我和 COMSOL 没有什么特别的关系——我们也像其他用户一样每年支付教室和研究许可的费用。但是这几年,我和 COMSOL 的 Johan Sundqvist, Ed Fontes, Patrik Bosander, Jerome Long, Nikos Vasileides, Bertil Walden, Jukka Tarvo, Niklas Rom, Eric Favre, Mina Sierou, Anna Dzugoutov, Peter Georen, Jeff Hiller, Lars Langemyr 等人建立了良好的关系,他们对我的两个项目给予了很大支持,提供给我很多资源帮助我消除建模中的困难,对建成各个模型做出了很多贡献,对章节草稿也提出了很多宝贵意见和建议。Yahoo! 的 FEMLAB 用户团体对我近几年的工作给予了特别的支持。我真心推荐新用户能够加入并阅读每日摘要。一些大师将他们的研究实例贡献给本书(见 [http://groups.yahoo.com/group/COMSOL\\_Users/](http://groups.yahoo.com/group/COMSOL_Users/))。本书中的一些文件(.m,.mat,.mph),可以从我的模型网页中找到(<http://eyrie.shef.ac.uk/femlab>)。

在此,对一直给予我支持和鼓励的各个合作组织和章节合作者们表示衷心的感谢,尤其对 Buddhi, Alex, Kiran, Jordan, Peter, George, Venkat, Dan, Ali, David, Jaime, Tanai, Julia 给予的宽厚话语和精妙想法表示由衷的谢意!

多物理场耦合模型及数值模拟在各领域的研究及应用正在快速地发展。本书的读者可通过如下方式获得实用的信息,新的期刊、国际多物理场期刊(<http://www.multiphysics.salford.ac.uk/>)和 Comsol Multiphysics 软件包([www.comsol.com](http://www.comsol.com)),同时可以访问中文网站([comsol.cn](http://comsol.cn))以获取更多的中文资料及在线的视频教程,Comsol软件对于复杂过程的耦合建模能力给用户呈现了广阔的应用空间:

本书整理了我近年来对 Comsol Multiphysics 软件的应用体会,同时我也随着软件一起“成长”。我最早的博士研究生中有一位在 1995 年就开始使用 Matlab 软件的 PDE toolbox,用于开发多相流电容层析成像重建算法,该工具箱也就是 Comsol Multiphysics (原 Femlab)软件的前身。我们早在 2001 年就购买了 Femlab 2.0 软件,她对有限元建模具有卓越的图形用户界面和扩充功能,我们用她来处理电动流和微通道流的混合。我在 2002 年 6 月首次提供了基于 Femlab 2.2 的加强模块,随着一系列的深入技术交流,她最终发展为有限元方法的过程建模和仿真。自从我们开发了更为有效的模块以及新模块实例,这个模块已经运行过 8 次,每一模块都引入了新的功能,并且我的研究团队已学会如何使用。随着 2005 年 Comsol Multiphysics 3.2 的引进,Femlab 根本的改革牢牢地集中在多物理场模型建立的准确定位。图形用户界面的操作界面以及给人的感觉已经改变了,所以很多对 Femlab 一步一步的描述不再和现代软件版面设计相匹配。处理例子的最好方法也不再是最初我用 Femlab 的方法。许多模型是对 Matlab 代码生成的混合 GUI 应用,随后是基本 Matlab 程序设计步骤。

Comsol Multiphysics 的 GUI 中新的内建工具和许多新特征一起给出了足够的功能,那些对 Matlab 程序设计不是特别需要的。我把一些能想到的列出来:

### 1. 求解管理器

求解管理器被看作一个复杂的平台以建立初始条件,能处理问题中的部分物理(单物理)模式得到解,或者在前一个解作为初始点时得到小的公差。在求解高非线性问题时,如果对解空间以足够近的初始值开始,你将一定仅得到一个解。Comsol Multiphysics 现在允许灵活地对多物理场模型建立初始估计/条件—物理模式或过程的不同组合以及不依赖复杂 Matlab 程序设计的对先前近似解的公式改变。

### 2. 基于数据和自定义函数的内插函数

我过去常常制作 m-文件函数来建立嵌于 Femlab 模型中的内插函数或复杂函数,但 Comsol Multiphysics 允许内建函数定义(和她们的符号导数),这对有限元矩阵组件是需要的。在精确模拟我的模型中的物理/热力学性质上,这些已证明了具有很高的有效性。

在一些例子中,热力学性质的曲线拟合对你的数据并不是正确的,但是通过内插函数(比如三次样条函数)就可以做到。现在这就简单了——你只要导入带有试验信息数据文件。

### 3. 附加的代数方程、常微分方程、瞬态方程和约束处理

Comsol Multiphysics 有大量工具用于处理辅助方程和条件,她们在 Femlab、Matlab 中允许使用高级编程语言,通过自定义程序来处理。我将详细说明 Femlab 中的工作区,以显示创建模型组建的能力,并且现在她们在 Comsol Multiphysics 的图形用户界面上是可处理的。

还有更多的对 Comsol Multiphysics 来说是独特的特征以及很多对有限元方法的运用选择,她们中的许多内容在这本书中我可能并没有涉及,这是因为她们在“后台”或者她们对我所处理的这类建模并不需要。我要感谢 Comsol Multiphysics 在我数值模拟研究过程中的突破,基于此我们已经能够开发整个新的研究和试验方法。我当前的研究重点在解决 PDE 系统的反问题方法,来解决科学和工程中的应用问题。第七章中给出了基本思路,由于我团队中的几个博士研究生和已经毕业的博士对反问题所作的研究,我们具备了足够的实力。有超过七篇以上的期刊文章是关于微流电流测定中的反问题,运用 PDE 从小试样中去求解复杂流和生物流的流变参数。其他包括从性能数据求解多相化学反应器和膜分离的设计参数,从营养吸收数据获得酵母代谢动力学,发射光谱中解释等离子体的结构动力学。

这种方法上的一个工程可能比 Navier-Stokes 方程更真实地表示对液体流的描述。因为多物理场过程的优良模型有助于协调建模和试验分析与设计。科学方法总是关于假设形成,检验,假设修正。在多物理场计算模型的科学研究中,模型是假定的,并且使用好的建模工具使修正变得更容易。

事实上,这是一本不同于过程建模和仿真的书——不同的建模方法和新例子学习。如果没有其他人的大量帮助,本书是不可能形成的。我非常高兴向她的推动者表示敬意——本书的译者 Comsol 中国区总代理——中仿科技公司(CnTech Co., Ltd)的周少林、盛卫心、马慧等优秀团队,并非常感谢同济大学的许震宇老师及赵超同学,按照本书完成了所有例题的勘定,并提供了所有模型的原始文件,在此一并感谢。本书所有实例的源文件都可以到中仿科技公司网站免费下载,或许您还会有意想不到的收获,因为公司网站同时发布了很多 Comsol 的 step by step 视频动画教程,详细网址是:[www.CnTech.com.cn](http://www.CnTech.com.cn)。中仿科技公司 CnTech Co., Ltd 的梁琳意识到我的书在中国会有大量的读者,并且对她的翻译出版作了所有的计划安排,我对此深表感激。

顺便说一下,在 Yahoo 上的 Comsol 用户群对各水平的多物理场建模者是一个活跃的交流区和值得浏览的地方,在中国也有一个比较活跃的 Comsol 讨论社区,感兴趣的可访问中国仿真互动网技术交流论坛[www.Simwe.com/forum/](http://www.Simwe.com/forum/),登录 Comsol 版块浏览。

Will Zimmerman

Professor of Biochemical Dynamical Systems

University of Sheffield, 20 July 2007.

# 目 录

|   |     |
|---|-----|
| COMSOL Multiphysics 简介 .....  | 1   |
| <i>W. B. J. Zimmerman</i>   |     |
| 第一章 COMSOL Multiphysics 及数值分析基础 .....                               | 18  |
| <i>W. B. J. Zimmerman</i>   |     |
| 第二章 发展方程的有限元分析 .....  | 45  |
| <i>W. B. J. Zimmerman, B. N. Hewakandamby</i>                       |     |
| 第三章 多物理场 .....  | 75  |
| <i>W. B. J. Zimmerman</i>   |     |
| 第四章 扩展多物理场 .....  | 96  |
| <i>W. B. J. Zimmerman, P. O. Mchedlov-Petrosyan, G. A. Khomenko</i> |     |
| 第五章 非线性动力学和线性系统分析 .....   | 116 |
| <i>W. B. J. Zimmerman</i>   |     |
| 第六章 变几何问题:连续和移动边界 .....   | 143 |
| <i>V. R. Gundabala, W. B. J. Zimmerman, A. F. Routh</i>             |     |
| 第七章 变量耦合:反问题,线性积分,积分方程和积分-微分方程 .....                                | 160 |
| <i>W. B. J. Zimmerman</i>   |     |
| 第八章 使用 level-set 法的多相流建模 .....                                      | 188 |
| <i>K. B. Deshpande, D. Smith, W. B. J. Zimmerman</i>                |     |
| 第九章 存在相变的自由表面流动问题模拟——三相流 .....                                      | 204 |
| <i>T. L. Marin</i>  |     |
| 第十章 沟槽微流道的牛顿流动 .....  | 212 |
| <i>D. G. Hassell, W. B. J. Zimmerman</i>                            |     |
| 第十一章 电动力学流体 .....   | 220 |
| <i>W. B. J. Zimmerman, J. M. MacInnes</i>                           |     |
| 第十二章 基于 Fokker-Planck 方程的等离子体模拟 .....                               | 236 |
| <i>A. Shajii, D. Smith</i>  |     |
| 第十三章 钢铁在防护层剥离情况下的缝隙腐蚀 .....   | 245 |
| <i>F. M. Song, N. Sridhar</i>                                       |     |
| 第十四章 直流微装置的磁流体动力学数值模拟 .....   | 255 |
| <i>J. H. L. Parada, W. B. J. Zimmerman</i>                          |     |
| 附录 COMSOL Multiphysics 和 MATLAB 矢量计算基础 .....                        | 265 |
| <i>W. B. J. Zimmerman, J. M. Rees</i>                               |     |



# COMSOL Multiphysics 简介

W. B. J. ZIMMERMAN

*Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield,*

*Newcastle Street, Sheffield S1 3JD United Kingdom*

*E-mail: w.zimmerman@shef.ac.uk*

最初 FEMLAB 是 MATLAB 编程语言和集成开发环境的一个强有效的建模软件包，后来将 COMSOL Multiphysics 作为 FEMLAB 的商业用名。可能这本书的大部分读者是被本书的标题和封面所吸引，之前对 COMSOL Multiphysics 的了解并不多。对于这部分读者，我衷心地推荐大家参加 COMSOL 公司在高校举办的各类研讨会，因为实践中得到的 COMSOL Multiphysics 经验要远比从书本、字面上得到的多。写这个简介主要是为了告诉大家写这本书的目的，并且举了一个精练的例子来说明如何用 COMSOL Multiphysics 对化工实例进行建模，从而使读者看到 COMSOL Multiphysics 建模的独特优点。如果读者想尽快熟悉 COMSOL Multiphysics 的图形用户界面 (GUI)，认识“什么是 COMSOL Multiphysics”，显然 COMSOL Multiphysics 的使用手册 (可从 COMSOL 网站上下载) 比本章更为有效。作为 COMSOL Multiphysics 的简介，本部分的重点是告诉读者如何确定一个模型并在 COMSOL Multiphysics 中实现，该方法便于对后续章节的学习。但是，我更希望通过对本部分的学习，能够激起读者对应用 COMSOL Multiphysics 建模的兴趣，这也正是本书要讲的内容。

## 1. 本书概述

第一~四章讲解第一个部分——“FEMLAB 化工建模”，这几章再现了我使用 COMSOL Multiphysics 的美好历程，但这并不是我写这本书的初衷。在我参加的一个长期项目中，需要一个能够适用于各种情况的偏微分方程 (PDE) 计算引擎，一旦我决定使用 COMSOL Multiphysics，就必须精通它。一个极端的做法是开一门关于 COMSOL Multiphysics 的课程，让研究生和其他感兴趣的人加入进来，大家疯狂地学习，进而建立一种文化和相应的电脑实验室。我在教过本科生和研究生数值分析、建模和模拟后积累了一些实例，所以在将这些模块实例改编为 COMSOL Multiphysics 模型后，便出现了本书的第一章。第二章是以前使用 MATLAB PDE 工具箱的产物，也介绍了必要的有限元方法。第三~七章是更有针对性地尝试发掘 COMSOL Multiphysics 的强大特性，通过系统模型开发，每一章分别介绍了其不同的特点。同时，我查找了自己所有的 PDE 模型并从同事处挑选了一些例子来介绍这些特点。而第八章是另一种类型。这些章节作为学习 COMSOL Multiphysics 的例子，与某一特殊实例相比是比较正统的。但是，这些例子着重研究 COMSOL /MATLAB 建模、分析和后处理，都是非常基

础的。如果让我教矢量微积分和 MATLAB 编程,我将把附录作为学习 COMSOL Multiphysics 的一个很好办法。

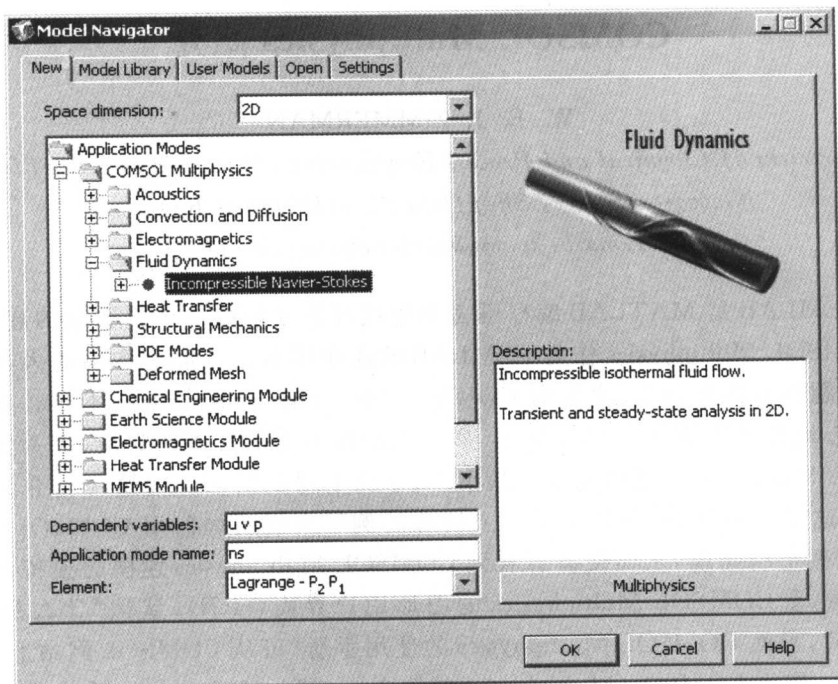


图 1

在模型导航栏中(图 1),预定义的实例模型以树状结构排列。这里是化工模块下的不可压缩 Navier-Stokes 模式。模型导航栏中将其定义为二维模型,具有三个独立变量,并使用混合单元类型拉格朗日  $p_1$  来求速度  $u$  和  $v$ ,压力  $p$  为拉格朗日  $p_1$ 。为保证 Navier-Stokes 求解的数值稳定性,常在有限元法中使用混序离散,并使用 SIMPLE<sup>[1]</sup> 方法求解。模型导航栏允许用户使用预定义的实例模式或通用 PDE 模式(系数型、通用型、弱型)来建立自己的模型。

适用读者:

本书主要针对使用 COMSOL Multiphysics 建模的化学工程专业学生,也可作为其他专业科研人员和工程师的 COMSOL Multiphysics 入门书籍。

本书目的:

本书目的在于介绍 COMSOL Multiphysics 的特性,这些特性使得建模计算更容易实现。这些特性将通过讲解一些经典的化学工程建模例子来予以展现,但是它们同时也适用于其他科学和工程领域。

侧重点:

本书侧重于介绍流体力学、传递现象和瞬态反应,基本上反映了作者在 PDE 方程数学建模和数值求解方面的研究兴趣。

## 1.1 建模与模拟

这是一本关于建模与编程的书,前 4 章的核心是介绍建模模块,其他章节则侧重于介

绍 COMSOL Multiphysics 的使用。模拟与建模的区别在于:模拟具有一定的随机性和演变性,例如模拟的积分部分可能使用同一个 PDE 计算引擎,但是往往包含更多的“用户自定义程序”。而本书建模实例的组织结构则像一本食谱——包含一些 MATLAB /COM-SOL Multiphysics 自带的非常重要的化工实例模型。但是这种讲授方式缺乏数值建模的哲学与方法内容,即这本书讲解“怎么做”,但是没有讲模型“为什么要这么做”和“这么做会怎么样”。

我们建模主要有两个初衷:

(1)严谨的物理化学模型有助于我们更好地理解物理现象,通过数值计算方法可以用数值精确地将其表示出来;

(2)更接近实际的近似模型,比严格精确计算更能够简便地表示参数对输出的动态影响。

本书不打算系统地讲解建模中的方程和边界条件是怎么来的——假定各种模型和简化是合理的。但是,对于大多数建模问题,模型本身是否合理十分关键,进行什么样的近似和简化也是建模过程的一部分。对什么是建模,以及如何建模的数学、科学和工程判断不应该割离开来。

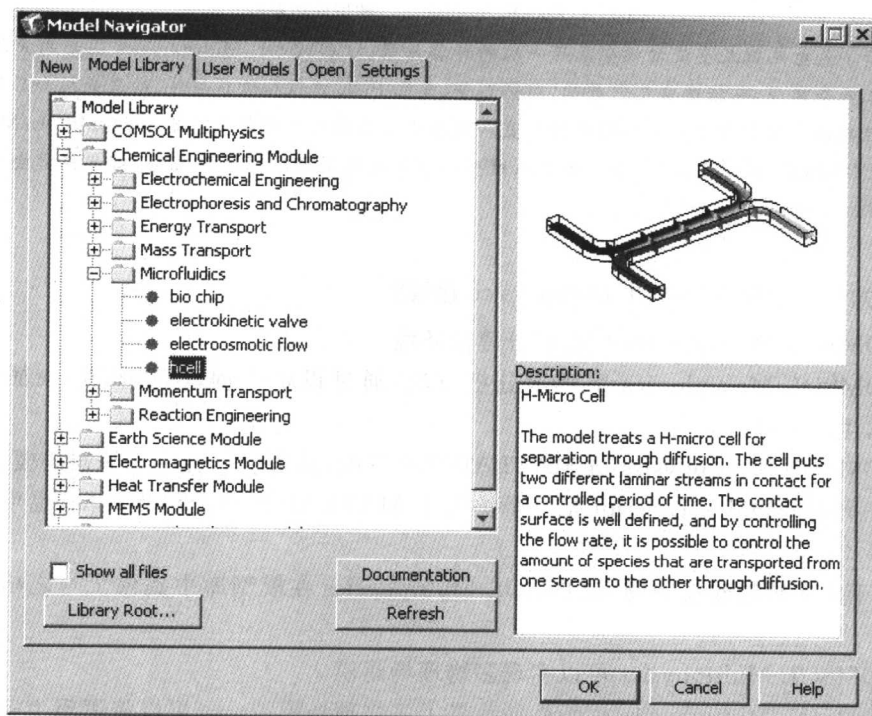


图 2

图 2 模型库中包含应用已有应用模式解决的各种问题,是由 COMSOL 工作人员制作或用户捐赠的。通过浏览 COMSOL Multiphysics 中的模型和模型库中对应的文档是学习建模的一条非常好的途径。模型库以各种实例方式组织,这里高亮显示的是氢电池的微尺度流动,在化工模块微尺度流动分支下。微尺度流动和 MEMS 是多物理场模拟中经常遇到的问题<sup>[2]</sup>。

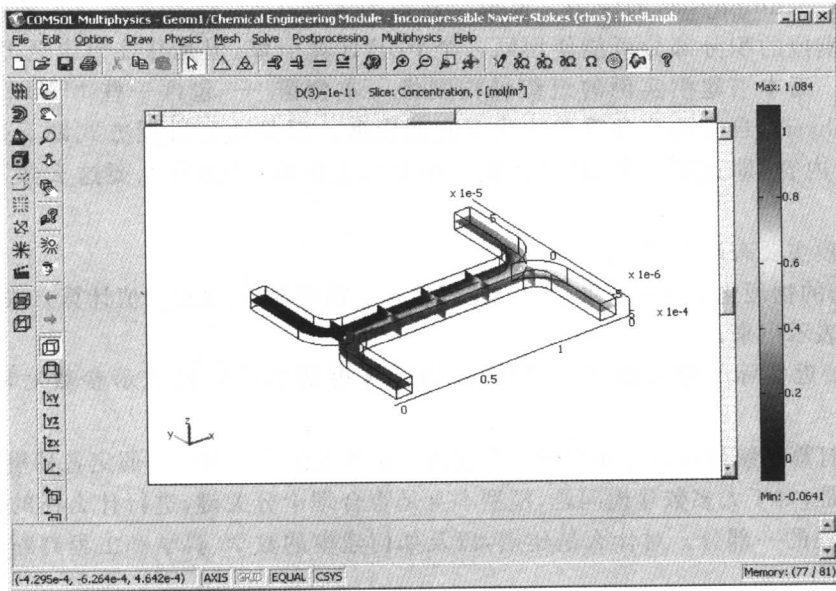


图3 COMSOL Multiphysics 的后处理界面

图3显示了氢电池微尺度流动模型最后一次的计算结果。COMSOL Multiphysics 图形用户界面提供了下拉菜单和工具条建模,包括建立几何结构、网格划分、建立 PDE 方程和边界条件、结果分析和后处理。注意底部的状态栏显示了可视窗口中鼠标所在的位置。状态栏上面的信息栏将实时显示 COMSOL/MATLAB 窗口中运行的 COMSOL/MATLAB 命令。如果从模型库中导入湍流静态搅拌器数据,信息栏将会显示“Loading data from static\_mixer. mat”信息。

## 1.2 为什么使用 COMSOL Multiphysics 建模?

(1)COMSOL Multiphysics 拥有积分建模环境。

(2)COMSOL Multiphysics 采用半分析方法:通过设定方程,COMSOL 象征性地建立 FEM 矩阵,生成文件。

(3)COMSOL Multiphysics 与 MATLAB 完全匹配,具备用户自定义编程建模、计算和后处理功能。同时,COMSOL Script 是一个类似于 MATLAB 的积分编程环境,也可以实现这些功能。

(4)对于大多数的建模问题,COMSOL Multiphysics 在模型库中提供了与之相适应的实例模式。

(5)COMSOL Multiphysics 可以实现多物理场建模。

(6)COMSOL Multiphysics 创新性地改进了多物理场模拟——可以将逻辑上完全不同的域和模型耦合起来同时求解。例如,由节点、连接、分散相、多尺度模型构成的网络。

正如第五章和第七章将要讲到的,扩展多物理场极其类似于常见过程模拟软件提供的连接,如 HYSYS、Aspen 或者 MATLAB 中的 Simulink 环境。COMSOL Multiphysics 将这些功能完全耦合进一个 PDE 引擎,这些优点使其能够与其他 CFD 软件包,如 FLUENT、CFX 和 ANSYS 等竞争。

### 1.3 COMSOL Multiphysics 建模策略

这本书主要介绍一些我对建模和模拟的认识,也许我的想法能够很好地帮助你使用 COMSOL Multiphysics 解决建模问题。通观对整本书中建模问题的思考,我总结出几条使用 COMSOL Multiphysics 建模的方法:

(1) 阅读模型库和使用手册。

(2) 建立一个数学模型,并和预制的模型进行比较。

(3) 是否所有的功能都可以由 COMSOL Multiphysics 图形用户界面来实现? 还是 PDE 引擎只是一个子程序?

从以下两方面可以看出 COMSOL Multiphysics 是一个集成建模环境:

(1) 数学模型建立、求解和后处理的交互与集成图形用户界面——软件包。

(2) 数学模型建立、求解和后处理的 MATLAB/COMSOL Script 子程序——编程语言。

本书旨在展示如何用这两种方法实现高效的建模。COMSOL Multiphysics 图形用户界面在建立问题和求解“假设分析”问题上更容易上手,是首选。而软件包的好处在于输入更便捷,所以值得认真学习其所有特性。

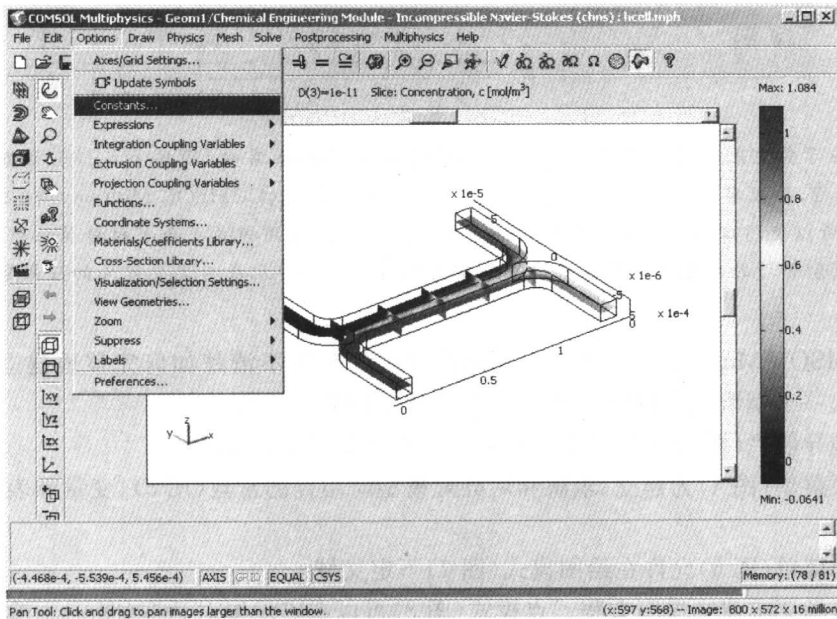


图 4

图 4 选项菜单允许定义各种特性:输入模型常数、栅格设定、可视化设定、编辑表达式等。

### 1.4 COMSOL Multiphysics 图形用户界面允许使用精密模板

预定义的实例模式为常见的计算提供了模板,而模型库则为学习者提供了学习实例。在 COMSOL Multiphysics 中建立数学模型通常分为以下 5 步:

- (1)绘图。定义相关的域并建立几何模型。
- (2)数学方程。在几何结构(子域物理场)内部、边界或顶点(边界和单点物理场)建立方程。
- (3)划分网格。COMSOL Multiphysics 有着强大的默认网格划分功能,当然也允许用户自定义划分方式。有限元方法的一个传统特色就是允许使用不规则任意网格。
- (4)求解。求解器有默认的鲁棒性,但是对于求解高非线性系统则需要选择合适的方法,例如,收敛判据、活跃方程式、初值、计算误差等,需要一定技巧。
- (5)后处理。如果不能有效显示计算结果,计算就失去了意义。

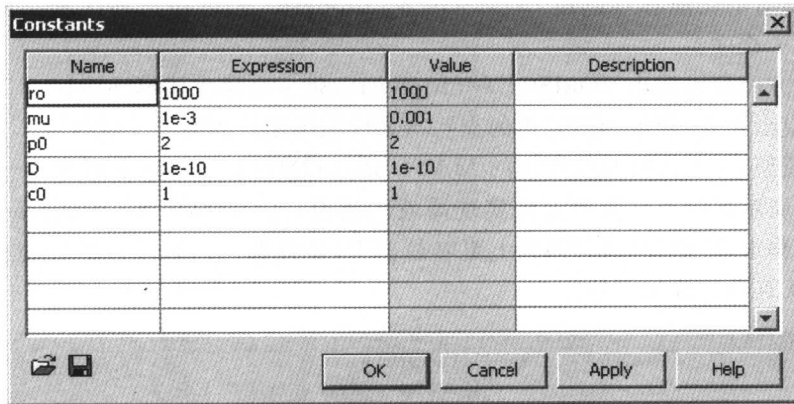


图 5

图 5 对应于氢电池微尺度流动定义的 COMSOL Multiphysics 常数(密度  $\rho_0 = 1000$ , 速度  $m_u = 10^{-3}$ , 基准压力  $p_0 = 2$ , 扩散率  $D = 1 \cdot 10^{-10}$ , 初始集中数  $c_0 = 1$ )。一般来说,COMSOL Multiphysics 不会假定任何的单元系统,所以使用者可以将物理特性作为常数输入。一些应用模式下会有材料属性数据库,其中包括了一些已经分配好的单元。使用者所要做的就是确保他们的单元在与预先定义的应用模式相混合时是相容的。

对 COMSOL Multiphysics 的一个长期批评之处在于不清楚如何完整地建立一个模型。但是实际上,一个模型是可以沿着菜单栏从左到右系统地建立的:

- (1)模型导航栏(图 1)可以从菜单按钮打开预置的实例和模型。
- (2)选项菜单(图 4)为建立、求解和后处理模型时用到的常数(图 5)、变量和表达式提供了定义的空间。
- (3)绘图菜单(图 6)允许在绘图模式(图 7)下定义域。
- (4)物理场菜单建立模型方程。点模式(图 8)可以在点设置对话框(图 9)中输入点约束。
- (5)物理场菜单(图 10)中的边界模式可以通过边界设置对话框(图 11)输入边界约束。
- (6)物理场菜单(图 12)中的子域模式允许在子域设置对话框中定义 PDE(图 13)。
- (7)网格菜单(图 14)。可以根据网格变量对话框中的数据,通过椭圆网格划分器显示并划分网格。初始化网格菜单项或者工具栏中的三角形按钮可以产生默认网格。
- (8)求解菜单用于设定求解过程中使用的方法与变量。点击求解器变量对话框中的求解按钮或工具栏中的 = 按钮进行求解计算。计算结果根据后处理时设定的变量在图形用户界面主窗口中显示,如图 3 所示。

- (9) 后处理菜单提供了多种图形和计算处理方法。  
 (10) 多物理场菜单允许增加和删除“应用模式”。

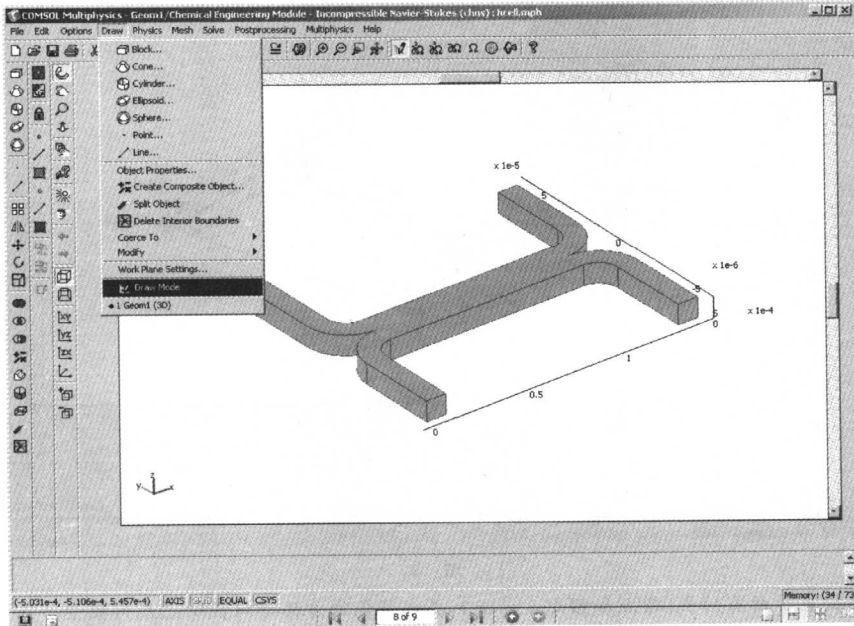


图 6 绘图菜单中的绘图模式

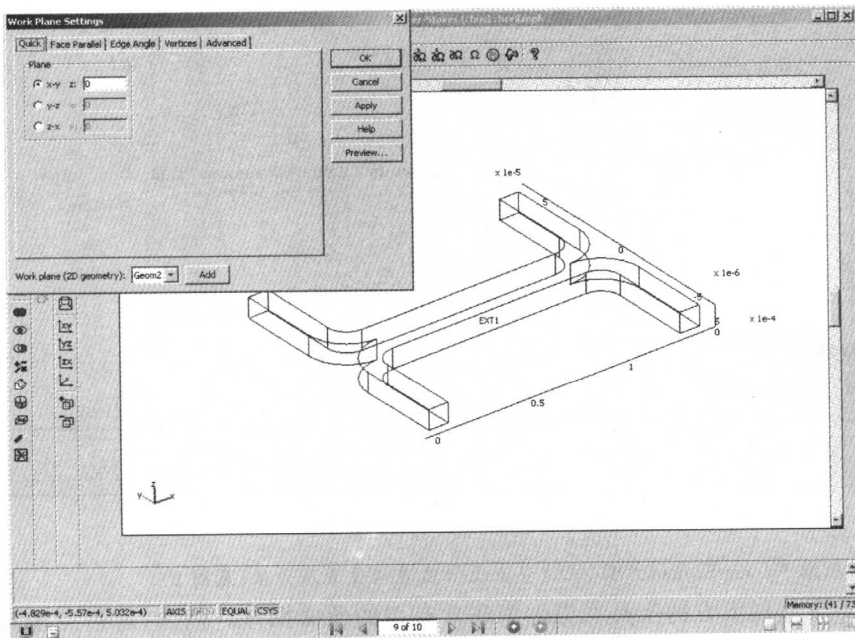


图 7

图 7 为氢电池微尺度流动的单个复合分析几何模型(EXT1)。此几何模型先通过简单的几何命令画出(矩形和弧命令),然后合并到一起,在二维工作平面上组成一个邻近域,再将其在深度方向扩展成三维模型。

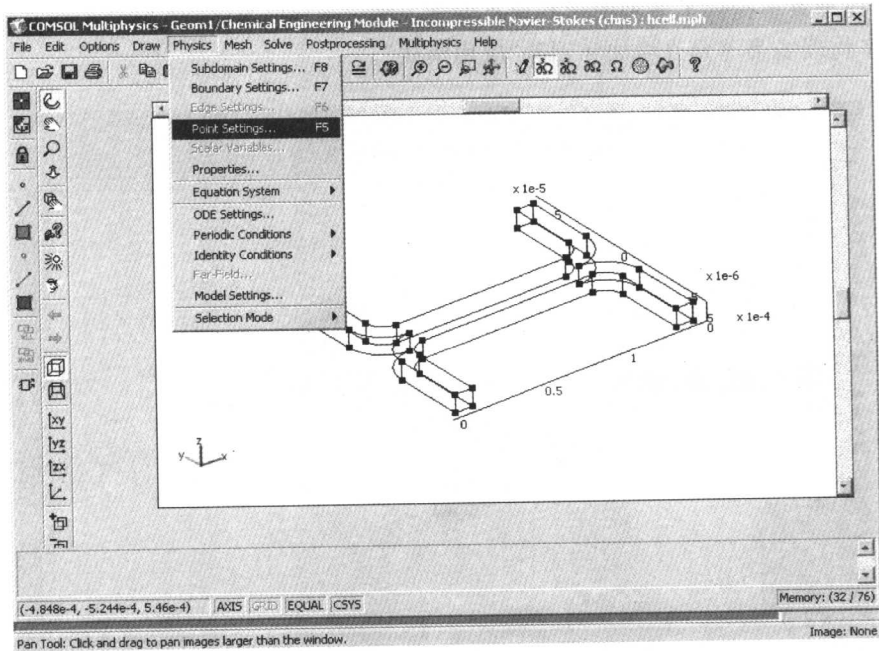


图 8

图 8 点模式显示所有的点(顶点和预定义的点),并以黑色立方体形状区别于几何模型。

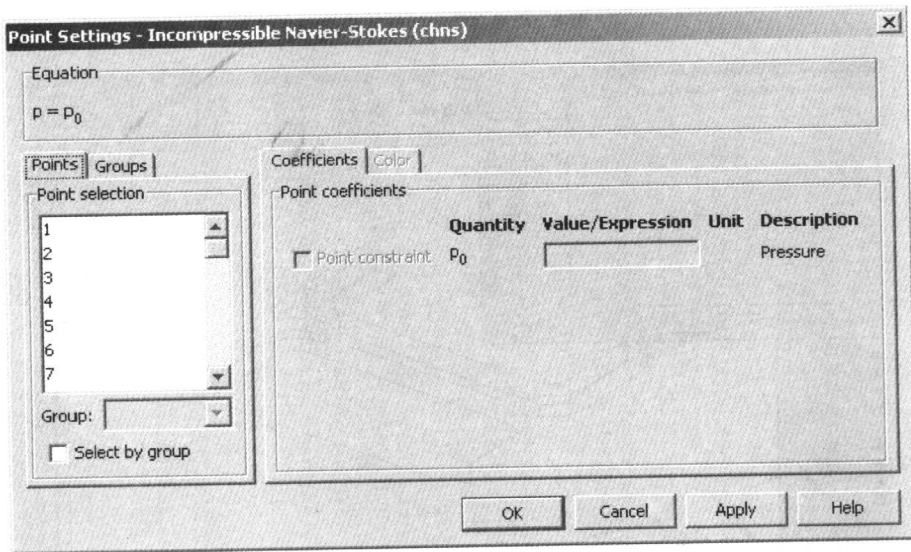


图 9 点设置对话框

对于不可压缩 Navier-Stokes 方程,在边界点上只能直接设置压力值(见图 9)。

(11)位于菜单栏下方的工具栏提供了非常有用的便捷操作。例如,通过点击某一个按钮就可以实现在三维模式、绘图模式、点模式、边界模式、子域模式和网格模式间的切换。

与传统方法相比,图形用户界面使得计算建模过程更为简单省时,但同时建模的复杂性也比其他软件包大。从这点上来看,图形用户界面既有优点,也有缺点。



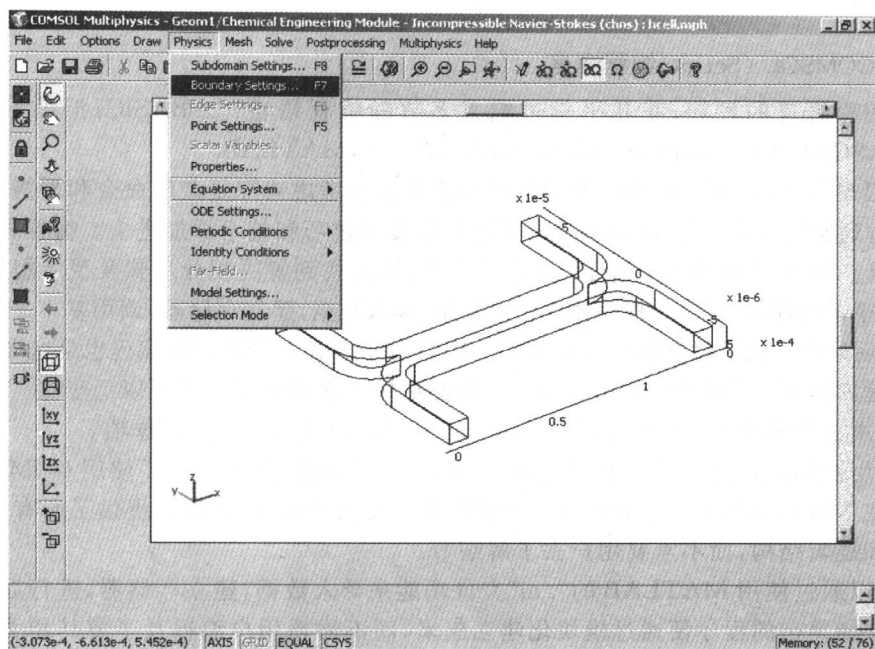


图 10

图 10 为物理场菜单的边界模式,可以对 FEM 模型的边界进行设置和数据输入。

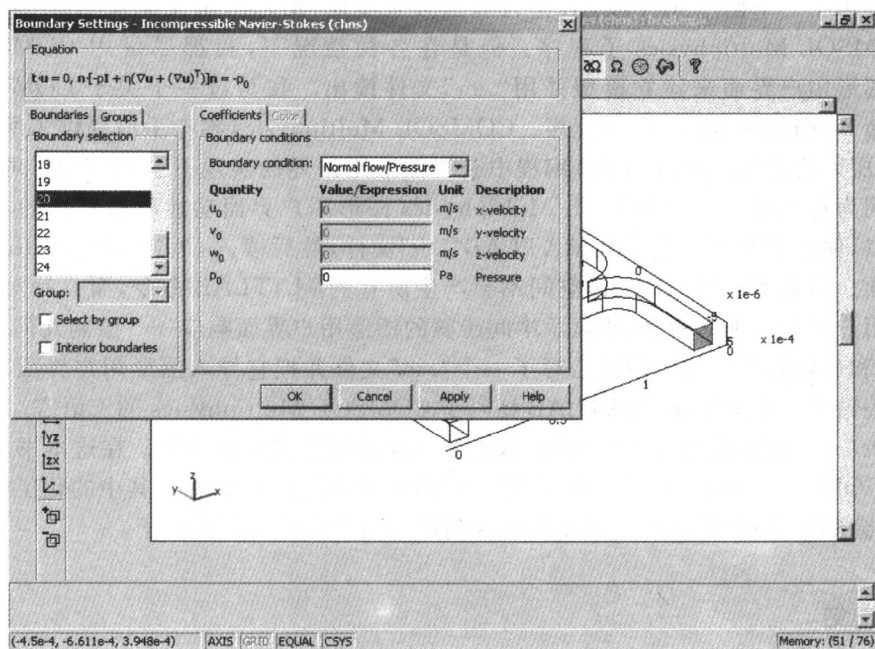


图 11

图 11 边界设定允许用户在预定义的边界条件范围内设定边界数据。这里定义流出边界压力为 20。待求解的方程显示在边界设定对话框的顶部左侧,而被选中的边界在滚动条窗口和图形显示窗口中都高亮显示。