

一种协同仿真方法及其在SOFC数值模拟中的应用

张雨英, 杨 晨

(重庆大学动力工程学院, 重庆 400030)



摘要: 针对当今复杂能源系统数值模拟的两大常用分析工具—Matlab 和 Fluent, 提出了一种基于 TCP/IP 的协同仿真方法, 并将其应用于 SOFC 的多尺度仿真。该方法以 WinSock 为框架, 采用文件 I/O 函数访问共享数据的方式, 完成两种工具之间的信息通讯。在 SOFC 多尺度仿真中, 利用 Fluent 建立 SOFC 单体的宏观尺度模型, 利用 Matlab 建立电化学反应扩散现象的介观尺度模型, 通过二者的协同仿真实现两个尺度模型的耦合模拟。结果表明, 该方法能有效地完成两种软件之间的协同仿真, 且结果较真实地反映了对应的实际特性。

关键词: 多尺度模拟; TCP/IP; Fluent; Matlab; SOFC; 协同仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2010) 03-0771-06

Collaborative Simulation Methodology and Its Application to SOFC

ZHANG Yu-ying, YANG Chen

(Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The collaborative simulation based on TCP/IP has been presented and has been applied to the multi-scale simulation of SOFC, which aim at the two general analyzing tools of numerical simulation for SOFC—Matlab and Fluent. The data have been exchanged between Matlab and Fluent through WinSock and I/O function of files. The macro-scale model of one cell has been developed using Fluent and the meso-scale model of diffusion phenomenon of electrochemical reaction has been built using Matlab, simultaneously, the cooperative simulation has been applied to achieve the coupling of the models in two scales. It is shown that the means can effectually complete the cooperation simulation of two soft wares, and the outcomes factually reflect the performance of reality system.

Key words: multi-scale modeling; TCP/IP; Fluent; Matlab; SOFC; collaborative simulation

引 言

半个多世纪来, 建模与仿真技术在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下, 已经发展形成了较完整的技术体系, 成为继理论研究和实验研究之后第三种认识、改造客观世界的重要手段之一^[1]。目前, 建模与仿真技术正向“网络化、虚拟化、智能化、协同化、普适化”为特征的现代化方向发展。当前建模与仿真技术研究与应用中值得关注的焦点问题包括复杂系统的建模仿真技术和网络化建模仿真技术^[1], 这也是本文研究的两个主要问题。

复杂系统建模与仿真技术将成为研究各类复杂系统的最重要手段。一个复杂系统通常涉及机械、电子、控制、计算机等不同的技术领域, 系统的组成呈现出分布、交互的特点。因此, 在复杂系统建模过程中, 通常先按照学科领域分成不同的子系统, 各子系统采用各自领域的仿真工具进行仿真分析, 以解决该领域内的问题。但单靠某一种或某一类仿真分析工具来解决涉及多领域的复杂系统问题还不现实。协同仿真(Collaborative Simulation)技术的思想正是源于这种工程需要^[2]。

管式固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种高温燃料电池, 是目前最接近商业化的发电技术之一。由于对其进行试验研

究的代价和成本偏高, 因此各国学者进行了越来越多的数值模拟研究。SOFC 是一个复杂能源系统, 涉及多种物理化学过程, 时空多尺度特征和行为是其中所有复杂现象的共同本质和量化的难点^[3]。目前在对宏观现象的仿真中普遍采用的平均方法无法模拟 SOFC 的内在机理, 难以具备准确的预测功能。前文提到的复杂系统协同仿真技术, 结合近年来得到关注的多尺度模拟方法可望有效解决这一问题^[4]。

多尺度模拟方法是以复杂系统在时间和空间上的多尺度特征为基础, 同时考虑多个尺度效应进行的模拟^[3]。它着眼于所求解的问题, 将整个系统划分为宏观、介观及微观尺度, 在各尺度上分别建立模型, 如宏观尺度采用基于连续介质假设的质量、动量及能量守恒等机理模型, 微观尺度采用分子动力学, 介观尺度采用格子 Boltzmann 方法(LBM)等^[5]。在各尺度分别模拟的同时, 提取出对其它尺度有影响的参数, 相互进行数据交换, 以消除各尺度建模方法中忽略的其它尺度效应, 从而减小整个系统模拟的误差及计算代价。多个尺度模型的求解过程显然具有极大的计算复杂性, 需要占用大量的内存和计算时间。以计算机网络为基础的协同仿真技术为大尺度、多尺度模拟提供了一个扩展性好、易于实现的解决方案。

目前复杂能源系统常用的两种仿真分析工具 Matlab 与 Fluent(以下简称 M&F), 与 C 语言有非常友好的接口。文献^[6,7]以水下机器人动态系统建模为对象, 完成了 M&F 的动态协同仿真。本文以 SOFC 系统多尺度模拟为背景, 以基于网络 TCP/IP 协议的 M&F 的协同仿真为对象, 以常规计算机

收稿日期: 2008-07-31

修回日期: 2008-08-14

基金项目: 国家自然科学基金 (50576106)

作者简介: 张雨英(1981-), 女, 四川人, 博士生, 研究方向为热能工程, 系统仿真; 杨晨(1963-), 男, 天津人, 教授, 博导, 研究方向为热力系统、动力机械及工程的仿真与控制。

网络组成的微机为并行系统, 利用 Fluent 建立 SOFC 宏观尺度下的计算流体力学(CFD)模型, 利用 Matlab 建立 SOFC 介观尺度下的电化学反应扩散模型。M&F 在不同计算机上运行以建立和求解 SOFC 在两种尺度下的模型, 通过 WinSock 程序实现机间通讯, 完成各尺度模型的数据交换和共享。

一般来讲, 整个仿真过程主要包括协同仿真、各尺度的仿真建模和二者的集成仿真等。协同仿真主要包括软件接口方式、机间通讯机制和同步机制的选择与确定; 各尺度建模主要包括系统的尺度划分、各模型的假设与简化以及选择适合的工具或方法建立各个尺度模型; 集成仿真主要包括耦合参数的确定、同步通讯编程的编写、共享数据存储等。

1 协同仿真框架

复杂系统的协同仿真具有结合多种仿真技术手段、存在信息协作关系(数据需求与信息共享)、所用仿真工具或方法多等特点。用于过程仿真的 Matlab、CFD 仿真的 Fluent, 多体动力学仿真的 ADAMS, 结构静力学仿真的 ANSYS 等软件, 虽可以有效完成复杂系统某个方面的设计仿真任务, 却很难处理涉及多学科交互的复杂仿真问题。很多商业化的设计仿真软件, 在提高自身仿真和分析功能的基础上, 都开始重视和其它相关专业领域软件的协同问题。

目前较为通用和流行的实现软件间协同仿真的方式主要有以下三种^[8]: i)联合仿真式(Co-Simulation), 各软件在运行前进行数据耦合关系定义和建立连接, 仿真开始后, 耦合的仿真数据通过进程间通讯或者网络通讯来实现双向交换和调用。ii)模型转换式(Model Transfer), 将一个仿真软件的模型转化为另一个仿真软件支持的特定格式的包含模型信息的数据文件或者动态链接库文件(dll), 实现模型级别的协同仿真。iii)求解器集成式(Solver Convergence), 实现两个不同仿真软件之间的求解器集成, 在其中一个仿真软件中可以调用另一个仿真软件的求解器, 从而完成协同仿真。

1.1 Matlab 与 Fluent 的接口方式

Matlab 是编程型开发平台, 其 M 语言既有结构化的控制语句, 又有面向对象编程的特性, 编程风格更符合人们的思维习惯; 以矩阵为基本数据单位, 编程和计算效率高, 可移植性好, 被称为第四代计算机语言。Matlab 有命令行与 M 程序(脚本 M 程序或函数 M 程序)两种运行方式。它的 Compiler 工具可将函数 M 程序编译成 C 语言程序, 同时还提供了可供 C 程序调用的计算引擎, 从而使用户能够充分利用 Matlab 的算法资源, 也为与其它软件接口提供了可能性。

Fluent 求解器支持 GUI(Graphical User Interface)方式和 TUI(Text User Interface)方式两种运行机制, 两种方式的指令都可保存为 Journal 文件, 外部程序则可通过带 Journal 文件参数的指令执行 Fluent。此外, Fluent 还提供了基于 C 语言的用户自定义函数(User-defined Function, UDF)扩展功能, 如图 1。这两种方式都使得 Fluent 可以通过 C 语言程序与

Matlab 进行接口, 从而实现二者的协同仿真。

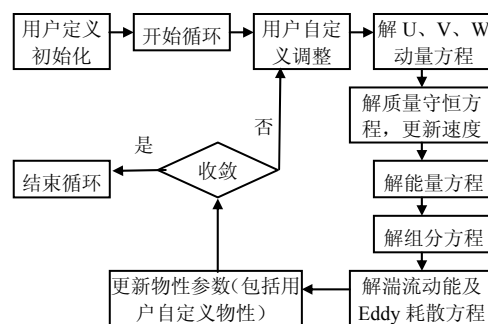


图1 离散求解器的求解流程

综上所述, 可以得到二者进行协同仿真的几种接口方式^[6]:

1) Matlab 在 M 函数中通过文件 I/O 函数访问共享数据, 而 Fluent 则在对应的 UDF 中通过 C 语言的文件 I/O 函数访问共享数据, 即联合仿真式;

2) Matlab 编写待求解模型的程序或模块, 通过编译成 C 函数, 然后在 Fluent 的 UDF 中调用, 即模型转换式;

3) Matlab 的 M 程序中通过命令“!fluent 3dd -i journal”启动 Fluent 以执行相应仿真任务, 即求解器集成式。

可见, M&F 之间对前述的三种协同仿真方式均支持。第一种方式较为通用, 它能够使这些软件独立地同步运行, 随时可以观察仿真结果的变化并进行调试, 具有良好的交互性。另外, 随着仿真的深入, 这种方式也便于随时添加新的子模型, 以更加完善和细化整体模型。第二种方式必须在仿真之前就将转换的模型建好, 因此仿真过程中的调试以及交互性能相对偏低。第三种方式因为没有直接传递参数的公共接口, 因此只能通过访问共享数据或修改 Journal 文件实现间接的参数传递, 交互性能不错, 但软件之间的独立性较差。

考虑到进一步工作将在本文工作的基础上加入微观以及系统尺度的模型, 同时提炼出一种通用的复杂能源系统协同仿真方法, 因此本文选择以第一种接口方式的协同仿真方法应用于 SOFC 的数值模拟, 从而提供一个独立软件、实时交互以及便捷调试的建模平台。

1.2 基于 TCP/IP 的机间通讯

由于不同尺度模型之间是相互耦合的, 因此它们在各自计算机上进行并行计算时必须要考虑解耦的问题, 本文通过 M&F 之间的机间通讯和相应的同步机制来实现解耦。

本文采用基于网络 TCP/IP 协议的机间通讯, 灵活而巧妙地将 Windows 的进程线程机制与 Socket 套接字的通讯机制融合在一起, 具有通讯效率高、传输速度快、可靠性好、可重用等优点。图 2 为并行计算中机间通讯示意图^[9]。

在机间通讯时, 每台计算机有一个通讯进程保持接收和发送两个线程。发送线程负责从缓存中提取需要传送的新数据写入套接字, 发送完毕即关闭; 接收线程负责从套接字中提取本机需要的新数据写入缓存中, 并始终保持接收状态监听来自套接字的接收指令^[10]。发送、接收数据以及监听分别

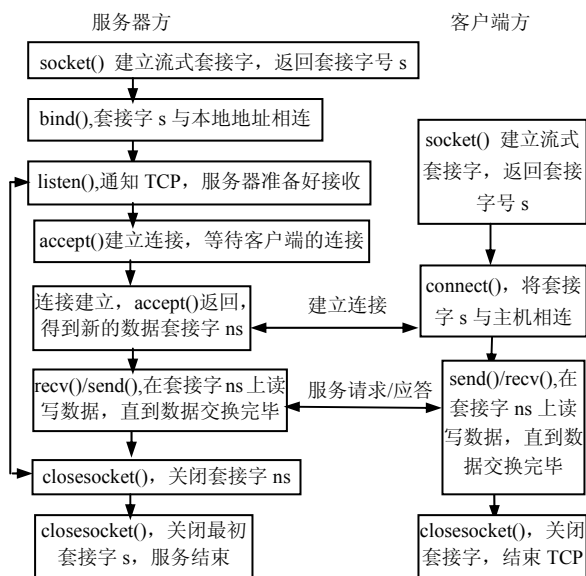


图2 机间Socket通讯示意图

通过 Socket 中的 send、recv 和 listen 函数来实现,完全基于现有的 Socket 技术和 TCP/IP 协议。网络中每台担负计算任务的电脑在维持上述通讯进程的同时,还要维持一个计算进程,这样数据交换在通讯进程中进行,新结果的计算则在计算进程中完成。计算进程直接从本地缓存中读取参数,而参数更新交给通讯进程和网络去完成,这样将大大地提高计算速度。网络每次仅需传输当前计算所需要的新参数和其它电脑计算需要的新的本机计算结果,大大降低了网络负载。

1.3 同步机制

1.3.1 同步机制简述

当把系统划分为 N 个子系统,分别在 N 个计算机上同时进行模拟时,如果各个子系统的数值运算彼此无关,互不依赖,整个并行计算系统的性能是最高的。但在实际的并行计算中,各个子系统或多或少是互相耦合的,它们相互之间必然需要交流信息,报告彼此的计算结果;需要调整进度,确保每个子系统的计算有条不紊地同步进行。

并行仿真系统将各子系统划分为不同的逻辑进程(Logic Process, LP),各逻辑进程之间通过发送事件消息共同推进模拟向前进行。由于通讯系统存在延迟,同时各逻辑进程之间的模拟进度不同,所以并行模拟通过时间戳(逻辑上的虚拟时间,表示事件之间的顺序关系)而不是实际时间表示事件之间的先后次序,且事件之间必须按照时间戳进行同步。因为众多计算机的速度、性能各有千秋,它们之间相互传递消息往往带有随机性、多发性等特点,而且有时消息处理过程中相互依赖性很强,必须通过一定的策略来维护其逻辑关系的正确。并行仿真系统中用来满足因果关系约束的方法称为并行仿真的同步机制。时间同步技术是并行分布式仿真的核心技术之一,其目的是提供一种仿真时间的推进机制,以确保并行处理的各节点之间的消息收发完全正确,即符合时

间逻辑的因果关系。一般来说,并行分布仿真协议可以分为两大类^[1]:保守协议和乐观协议,二者的区别在于在模拟过程中是否允许局部因果错误的发生。

保守同步协议,又称 CMB(Chandy-Misra-Bryant)协议,最早由 Chandy 和 Misra 提出,随后 Bryant 也提出同样的算法。保守主要是指该算法严格避免乱序模拟事件的发生,只有在确信局部因果关系限制没有被破坏时,才会执行下一个事件。保守的逻辑进程仿真就可以看作是一些 LP 的集合,由一套直接相连的、可靠的、先进先出(FIFO)通信通道组成的逻辑进程图。由于保守算法严格遵守本地因果约束条件,因此需要不断地判断是否可以安全地处理该事件,即确保可能影响该事件发生的所有前因事件都已经“发生过”,这极容易造成仿真死锁和存储溢出的问题。解决死锁的方法有很多,比较典型和应用最广的是空消息算法。存储溢出可以通过“保守时间窗”等技术尽量予以避免。

乐观同步协议与保守机制相反,它规定:只要有消息到达,进程马上执行,当发现一个时间戳较小的事件到达时,返回较小的时间戳重新模拟,同时取消该时间戳后发送给其它逻辑进程的输出消息,以此确保整个系统模拟结果的正确性。一般情况下,各子系统分别独立地向前模拟,但作为一个整体,各子系统之间必然存在关联。当由于不同子系统间发生通讯并引起局部因果错误时,乐观策略通过状态保存、反向计算及回退缓和等同步方式进行纠正。

保守协议中要求必须保持事件以不减的时间顺序执行,它依靠阻塞来保证相关性约束,严格禁止发生因果关系错误,即保证依据时间的逻辑先后顺序处理事件。与之相反,乐观的方法依赖于检测同步期间的错误并使用回退机制来恢复出现的错误,后者更侧重于充分利用系统平台的并行计算能力,设定分布在每个处理机上的 LP 可以积极地在空闲的处理机上处理事件,一旦出现任何一个关系错误则及时进行回退,并且恢复系统上一时刻的状态。

从实践来看,乐观策略能更充分利用仿真系统内在的并行机制,具有较高效率,但是需要很多计算资源、存储资源而增加了仿真运行的代价。保守策略则不存在这个问题,已处理的事件绝对没有因果错误,因而不会再重新执行,但保守策略一味追求 LP 的安全执行、要求各 LP 间消息传递拓扑结构在仿真开始之前就确定,因此致命的缺点是容易发生死锁的情况,使仿真被迫停止。

1.3.2 同步机制的确定

由于选用 M&F 之间的第一种接口方式, M&F 通过共享文件的读取来达到耦合参数的交换,因此在基于网络的协同仿真中,以两台计算机为例,负担 Fluent 建模求解的电脑(称为客户端 Client)必须同时运行 Matlab 以完成机间通讯和数据交换,而负担 Matlab 建模求解的计算机(称为服务器 Server)则只需在 Matlab 模型中加入通讯 M 文件即可同时完成求解与通讯的功能。于是,基于网络的协同仿真过程中涉

及到两个方面的同步机制: 1) 运行于 Client 上的 M&F 之间读写共享文件的数据同步; 2) 运行于 Client 与 Server 上的 Matlab 之间基于 TCP/IP 通讯的数据同步。

首先采用波形松弛法^[12]作为上述两个同步的主要策略。该方法提出在每一个求解区间内忽略各子系统之间的耦合, 在该区间上各子系统各自独立地进行求解, 这里选用 Fluent 的每一步迭代为求解区间进行通讯和 I/O 操作。在此同步机制的作用下, 机间通讯和读写共享文件只需在每一步迭代之间进行, 而在每一步迭代的过程中, 两个模型各自独立, 这就有效地节省了通讯开销, 提高了并行计算的粒度(浮点运算数与通讯字节数之比, 即计算时间与通讯时间之比)。

其次, 在同步判断与纠错时再实施乐观同步机制, 执行过程如下。在求解 LP、通讯 LP 和读写 LP 执行之前, 首先进行同步判断, 同步则执行, 不同步, 若本机快则等待, 若本机慢则跳回本机与之同步的时刻继续执行。以两台电脑为例, 对于客户端的 Fluent, 首先迭代计算出服务器的 Matlab 所需的耦合参数, 并将其写入共享文件中; 接下来读取服务器的 Matlab 计算、发送并由客户端 Matlab 接收、写入共享文件的数据, 并与曾经写入的数据比对, 确定是同步的或者相互对应的, 则进入下一步迭代, 否则继续重复读取动作或者跳回本机对应的同步点继续执行。由于客户端的 Fluent 已经进行了相应的判断, 因此客户端的 Matlab 不用进行 I/O 操作的同步判断, 直接读取共享文件中的数据, 通过 TCP/IP 和 Socket 发送给服务器的 Matlab; 然后接收服务器的 Matlab 发送的数据, 通过对比本机上设置的计数器与接收到数据中的对应的服务器上设置的计数器的值, 同步则将数据写入共享文件, 否则继续接收或跳回本机计数器对应的同步点继续执行。对于服务器的 Matlab, 首先接收客户端的 Matlab 发送的数据, 同样也是进行计数器数值的比对, 不同步则继续接收直到同步或跳回本机计数器对应的同步点继续执行, 同步则用接收到的数据进行迭代求解; 接着将计算结果通过 TCP/IP 和 Socket 发送给客户端的 Matlab。

2 SOFC 多尺度模型的建立

文献[13,14]等分别对固体氧化物燃料电池(SOFC)进行了不同程度的传热与传质模拟研究, 但都只考虑了一个主要尺度。本文主要从宏观和介观两个尺度对 SOFC 进行了简单的性能仿真分析。

2.1 基于 LBM 的介观尺度反应扩散模型

近年来反应扩散过程的模拟越来越受到人们的关注, LBM 在求解反应扩散过程方面取得了较大的进展。采用格子 Boltzmann 方法来研究反应扩散现象, 基本思想是在碰撞算子中加入反应项, 常用形式是著名的 Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) 碰撞算子里加上反应项, 即基于格子 Boltzmann 方法的反应扩散演化方程为^[15,16]

$$f_{s,i}(x+e_i\Delta t, t+\Delta t) = f_{s,i}(x, t) - \frac{1}{\tau_s} [f_{s,i}(x, t) - f_{s,i}^{eq}(x, t)] + R_s(\rho) / M(1)$$

其中 $\Omega_{s,i}(x, t)$ 是碰撞算子; $f_{s,i}$ 是沿 i 方向的粒子速度分布函数; $f_{s,i}^{eq}$ 是 $f_{s,i}$ 的平衡状态; τ_s 单松弛时间; M 是格子模型中的速度数; $R_s(\rho)$ 是反应扩散方程里的反应项, 由具体化学反应决定。

本文以 $H_2 + 0.5O_2 = H_2O$ 反应为例, 采用标准 LBM 九速八方格子模型, 对 SOFC 的反应扩散过程进行模拟, 采用 Matlab 的 M 文件编写建立模型。

2.2 宏观 CFD 模型

本文研究的 SOFC 的 CFD 模型采用 Gambit 建立几何模型, 尺寸如表 1 所示^[13]。然后, 利用 Gambit 的网格划分工具, 将计算区域离散化, 整个计算区域共划分为 480000 个四面体网格单元。将网格文件导入 Fluent 求解器, 并进行假设和边界条件的设置^[13,14,17]。

表1 SOFC的几何参数

$r_{pipe}(cm)$	0.5	$\delta_e(cm)$	0.004
$\delta_{pipe}(cm)$	0.1	$r_a(cm)$	1.004
$r_c(cm)$	0.8	$\delta_a(cm)$	0.01
$\delta_c(cm)$	0.2	$r_o(cm)$	1.4
$r_e(cm)$	1	$L(cm)$	50

最后, 采用 Fluent 的 UDF 编写 C 程序定义若干源项和一个调整函数, 前者对部分边界条件进行设定, 后者则是实现每一步迭代时与 Matlab 侧模型进行数据交换与共享。

2.3 在多尺度建模中应用 M&F 协同仿真

Matlab 侧的 LBM 模型与 Fluent 侧的 CFD 模型分别在不同的计算机上进行求解, 同时 Matlab 侧的机间通讯 M 程序与 Fluent 侧的 UDF 调整函数分别通过基于 TCP/IP 的 WinSock 通讯和文件 I/O 函数访问共享数据来进行模型间的数据交换, 从而完成两个尺度的耦合计算, 计算流程图如图 3。Matlab 实时给 Fluent 提供能量源项的求解数据; 同时 Fluent 又实时给 Matlab 提供温度场计算结果。

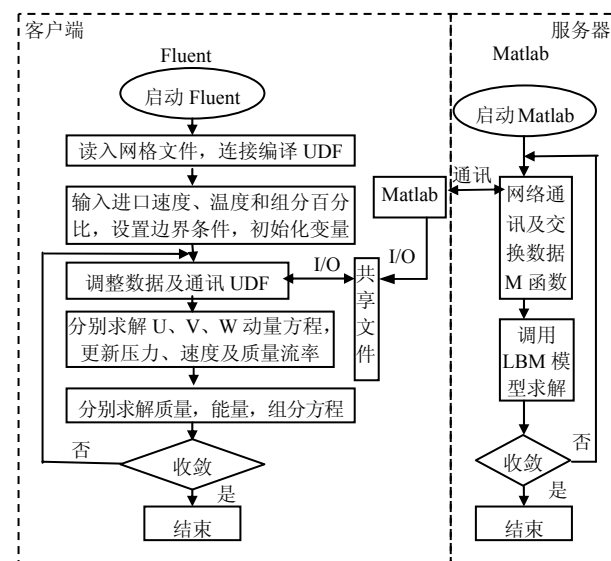


图3 Matlab与Fluent协同仿真流程图

3 多尺度模拟结果及分析

通过协同仿真并行计算,得到了图4-图7的协同仿真结果,分别为速度、阳极组分和阴极组分在 $Y=0$ 截面的云图;以及图7的协同仿真与单尺度仿真的温度场对比图。Fluent 单机计算迭代了218步,耦合计算219步,耗时相差不大,这是因为Fluent 仅仅在每一步迭代过程中才与Matlab 进行通信和数据读写,并且这些进程所消耗的时间与Fluent 完成一步迭代所用的时间相比要小很多。

燃料从右侧外圈进入流道,氧化剂在导管的引导下先从左侧进入电池内部预热,在折返的途中通过多孔介质与燃料气体发生电化学反应,可以将其视为顺流的情形。由图4可以看出,上下均有两条速度接近零的深蓝色条状区域。最靠里的两条是空气导管,因为采用无滑移固体边界条件,故速度为零。而稍靠外的两条深蓝色区域则是阴极/电解质/阳极层,由于阴阳极为多孔介质,主要靠扩散输运,速度相对流道小几个数量级,因而在图中显示近似为零。

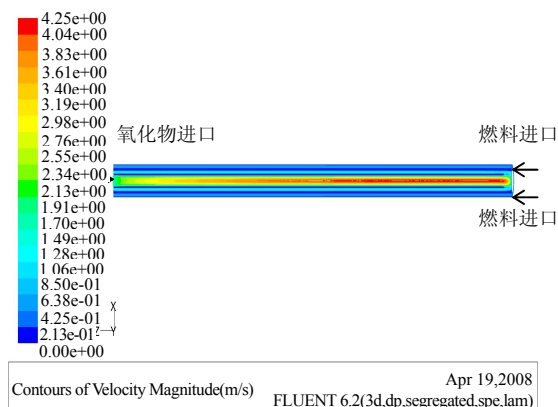


图4 $Y=0$ 截面的速度等高云图

图5和图6是各组分沿着流动方向的质量分数变化。图5中,沿着流动方向,电化学反应逐步发生,消耗 H_2 ,产生水蒸气,因此 H_2 质量分数从0.476到0.460逐渐降低,水蒸气质量分数从0.524到0.540逐渐增大。同样,图6中,随着反应的发生,消耗 O_2 ,虽然没有产物,但 O_2 质量分数仍然从0.233到0.228逐渐降低, N_2 质量分数则从0.767到0.772逐渐增大。

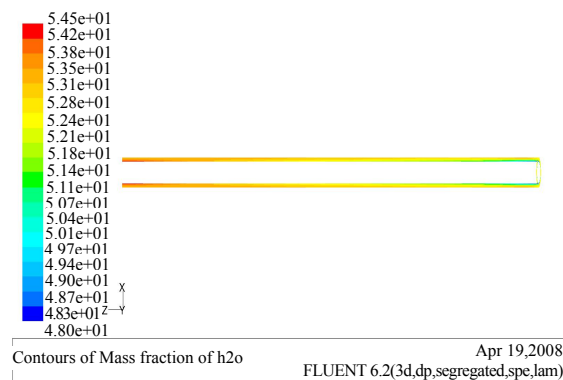
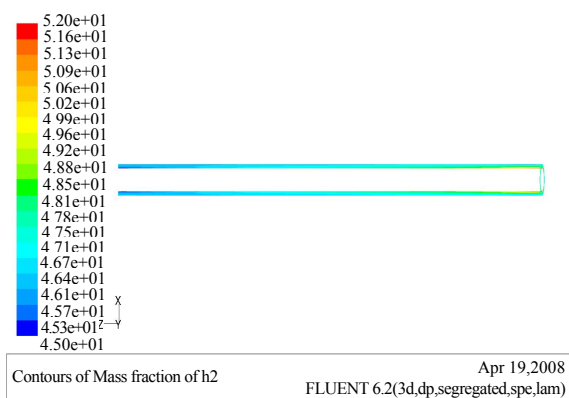


图5 阳极组分沿流动方向的质量分数分布

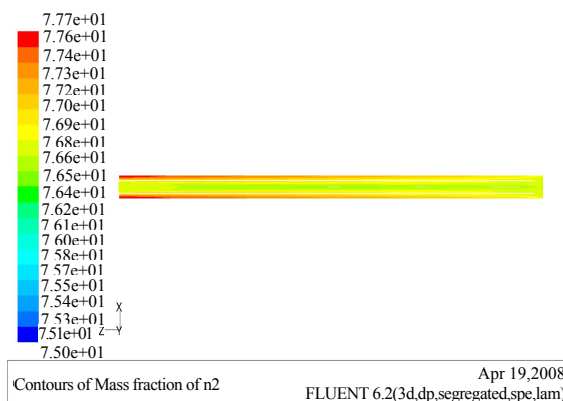
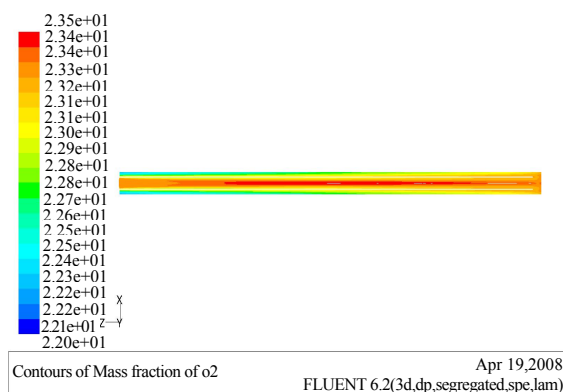
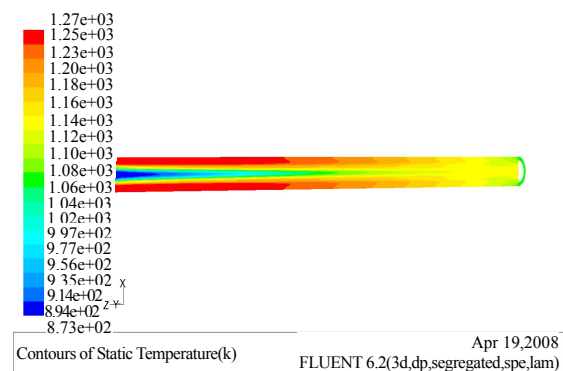


图6 阴极组分沿流动方向的质量分数分布

图7显示气体温度沿着流动方向逐渐升高,进口温度最低,出口处达到最大。除了阴阳极气体的换热外,最主要的影响因素就是电化学反应释放的热量。图7中左侧图为耦合计算的结果,右侧图为单尺度计算结果。图中还可以看出耦



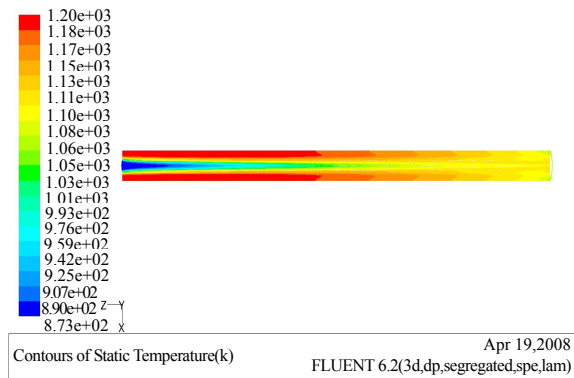


图7 协同仿真与单机计算的温度场对比

合计算的温度场比单尺度计算的温度场更高,这是由于前者在计算过程中加入了由 LBM 模型计算所得数据产生的对能量源项的影响,而后者则是忽略了这部分影响。联合仿真中,整个电池的平均工作温度在 1210K 左右,而单尺度仿真的平均温度为 1162K。

4 结论

本文提出了一种应用于复杂能源系统数值模拟的基于 TCP/IP 的多尺度协同仿真方法,它以 WinSock 为纽带,采用文件 I/O 函数访问共享数据的方式,将 M&F 各自建立的模型相耦合,从而完成了多尺度的模拟。

对 SOFC 的传热传质数值模拟研究结果表明,该方法的计算结果能较真实地反映对象的流场分布。通过对比联机耦合计算与传统单机计算的结果,可以看出,协同仿真更真实地反映出了电化学扩散反应对整个 SOFC 流场的影响。

虽然仿真实例中仅实现了介观与宏观两个尺度的协同仿真,但其方法为实现更大规模和更复杂的多尺度模拟建立了框架。下一步工作将加入微观及系统尺度,完成介观—微观—宏观—系统相耦合的更完整的多尺度仿真。另外,将该方法应用于其它复杂能源系统多尺度模拟,也是今后的一个研究方向。通过对多种类型复杂能源系统多尺度建模的研究及结果分析,最终得到复杂能源系统多尺度协同仿真的通用方法和步骤。

参考文献:

- [1] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1871-1878 (LI Bo-hu, CAI Xu-dong, ZHU Wen-hai, DI Yan-qiang. Some Focusing Points in Development of Modern Modeling and Simulation Technology [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2004, 16(9): 1871-1878.)
- [2] 熊光楞, 郭斌, 陈晓波, 等. 协同仿真技术与虚拟样机技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] Li Jinghai, Zhang Jiayuan, Ge Wei, Liu Xinhua. Multi-scale methodology for complex systems [J]. Chemical Engineering Science (S0009-2509), 2004, 59(8-9): 1687-1700.
- [4] E Weinan, Ming Pingbing. Analysis of multiscale methods [J]. Journal of Computational Mathematics (S0254-9409), 2004, 22(2): 210-219.
- [5] 李创, 陈天宇. 基于格子 Boltzmann 方法的混沌微混合器仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1369-1371. (LI Chuang, CHEN Tian-yu. A Simulation Research for Chaotic Micro Mixer Based on Lattice Boltzmann Method [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2004, 16(7): 1369-1371.)
- [6] 谢海斌, 张代兵, 沈林成. 基于 MATLAB/ SIMULINK 与 FLUENT 的协调仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1824-1827. (XIE Hai-bin, ZHANG Dai-bin, SHEN Lin-cheng. Collaborative Simulation Based on MATLAB/Simulink and FLUENT [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(8): 1824-1827.)
- [7] 谢海斌, 沈林成. 水下机器人动态系统协同建模方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 2130-2133. (XIE Hai-bin, SHEN Lin-cheng. Collaborative Modeling of Underwater Vehicle Dynamic System [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(9): 2130-2133.)
- [8] 王晓东, 毕开波, 周须峰. 基于 ADAMS 与 Simulink 的协同仿真技术及应用[J]. 计算机仿真, 2007, 24(4): 271-274.
- [9] 蒋东兴, 林鄂华, 陈棋德, 等. Windows Sockets 网络程序设计大全 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] 曹力, 刘晓平. 局域网中分布式仿真系统的通讯模型[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2951-2954. (CAO Li, LIU Xiao-ping. Network Communication Model for Distribute Simulation System in Local Area Network [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(13): 2951-2954.)
- [11] 李俊红, 解建军, 王喜年, 等. 并行离散事件模拟的同步机制研究 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(13): 2375-2377.
- [12] 肖田元, 张燕云, 陈加栋. 系统仿真导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] 杨晨, 张雨英, 徐泽亚. 管式 SOFC 内部传热传质的数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3206-3209. (YANG Chen, ZHANG Yu-ying, CHEN Ze-ya. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in SOFC [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(14): 3206-3209.)
- [14] 史翊翔, 李晨. 管式固体氧化物燃料电池机理模型与性能分析[J]. 化工学报, 2007, 58(3): 722-727.
- [15] 郭照立, 郑楚光, 李青, 等. 流体动力学的格子 Boltzmann 方法 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
- [16] Chongxun Pan, Jan F Prins, Cass T Miller. A high-performance lattice Boltzmann implementation to model flow in porous media [J]. Computer Physics Communications (S0010-4655), 2004, 158(2): 89-105.
- [17] N Autissier, D Larrain, J Van Herle, D Favrat. CFD simulation tool for solid oxide fuel cells [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2004, 131(1-2): 313-319.