

基于组件的水力数值模拟可视化系统*

周振红¹, 杨国录¹, 周洞汝²

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 传统的水力数值模拟方式难以直观、形象地展示数学模型的内在规律。本文旨在探索新的水力数值模拟方式, 应用软件工程新出现的组件编程模型封装水力数学模型, 以使其数值模拟过程实现可视化, 并依据可视化反馈信息对数值计算实施驾驭。

关键词: 水力数值模拟; 可视化; 组件对象模型

中图分类号: TV 131.65 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)01-0009-05

现行的水力数值模拟大多是“黑箱”操作, 众多的模拟过程被隐藏在幕后, 不具有物理模拟那样的直观可视性。而且, 数值成果合理与否只有等到计算终了时, 从分析一系列的静态图形中得知。这种运作方式存在明显的不足: ①无法直观了解各模拟量的变化规律; ②由于“黑箱”的屏蔽作用, 很可能导致参数调整的人为性; ③难以适应周界条件或运行工况发生的变化; ④静态文本和图形的成果提交方式不能很好地适应形势发展的要求。

针对上述问题, 本文将探索新的水力数值模拟方式, 应用工程软件的先进编程模型封装所用的水力数学模型, 使其数值模拟过程实现可视化^[1]。

1 编程模型

迄今为止, 软件工程^[2]先后出现了三种较为成功的编程模型: 面向过程的结构化编程、面向对象编程和组件对象编程。

(1) 传统的水力数值计算编程, 主要是采取面向过程的结构化编程, 如 Fortran、C 程序。程序设计采用功能分解方法, 将一个大的计算任务分解成一系列子任务, 分别用众多的例程(子程序和函数的统称)来实现, 程序运行自顶向下、顺序执行。在这种编程模式下, 如果编程语言或开发环境提供了图形库, 可以实现跟踪处理。

(2) 面向对象编程, 将数据和对数据的操作作用对象来封装, 使问题空间和计算机求解空间在概念上得到统一。它利用对象的封装性、继承性和多态性, 使应用程序的开发和维护变得容易进行。这种编程模式提供了消息(或事件)机制, 借此可以与程序进行交互, 进而达到控制程

* 收稿日期: 2000-12-01; 修订日期: 2001-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50099620)

作者简介: 周振红(1963-), 男, 山东蓬莱人, 武汉大学博士后, 从事水沙数值模拟及科学计算可视化研究。

序执行的目的。

(3) 组件对象模型 COM^[3], 仍采取面向对象的思维方式设计程序, 但组件对象模型摒弃了面向对象模型的继承机制, 利用包含和聚合机制在二进制级上实现软件代码的重用。组件对象模型拥有公用的二进制标准, 这一标准使得“零部件组装式”的软件开发方式成为现实。基于组件的软件有三个突出表现: 一是, 创建能进行交互操作的组件不依赖于具体的语言, 即语言无关性; 二是, 组件可视现场情况在单机或网络环境下任意布署, 即位置透明性; 三是, 各组件可独立地进行开发与维护。

在上述三个编程模型中, 组件对象模型的优势十分明显, 因此我们推荐采用此模型进行水力数值模拟的交互视算编程。

2 水力数学模型的封装

用上述组件模型封装水力数学模型, 采取以下步骤: 先用动态链接库封装执行水力数值计算的多个例程, 再将库中的例程转换为组件对象的接口成员(方法)。下面结合具体的水力数学模型——湍流射流, 探究其封装机制。

2.1 数学模型

作为水力数值模拟可视化的一个范例模型, 建立了环境问题温排水的变密度流数学模型^[4]。该模型经过一系列的概化和处理, 诸如常温、常压、常速、浓度变化不大、流体不可压缩的假设、布辛涅斯克近似、时均化处理、引入 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型、无量纲化处理, 最终得到用于模拟温排水变化过程的三维不可压缩对流扩散问题的控制方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$R_{ei} \frac{\partial u_i}{\partial t} + R_{ei} \left[u_j - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + R_{ei} \left[-\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{ek} \frac{\partial k}{\partial t} + R_{ek} \left[u_j - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} + R_{ek} \left[P_k - \varepsilon + R_i \frac{v_i}{P_{rt}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$R_{e\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + R_{e\varepsilon} \left[u_j - \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_j^2} + R_{e\varepsilon} \left[\frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + C_{\varepsilon 2} R_i \frac{\varepsilon}{k} \frac{v_i}{P_{rt}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$R_{eT} \frac{\partial T}{\partial t} + R_{eT} \left[u_j - \frac{1}{P_{rt}} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (5)$$

式中 $R_{ei} = R_e / (1 + R_{\partial i} / \sigma_i)$; $R_{ek} = R_e / (1 + R_{\partial i} / \sigma_k)$; $R_{e\varepsilon} = R_e / (1 + R_{\partial i} / \sigma_\varepsilon)$; $R_{eT} = 1 / (1 + R_e P_r + v_i / P_{rt})$, P_r 普朗特数, P_{rt} 湍流普朗特数; $R_i = \frac{gL(T_0 - T_a)}{u_0^2 T_a}$ 理查逊数。

将式(2)~(5)写成一般形式: $D\Phi + 2A\Phi_x + 2B\Phi_y + 2C\Phi_z = \nabla^2 \Phi + S_\Phi$ (6)

本文的数值计算假定: 一股具有温度 T_0 、流速 u_0 的热射流, 从宽度为 B 的窄缝垂直流入流速 u_a 、温度 T_a ($T_a < T_0$) 的均匀横流中。在这种情况下, 上述对流扩散方程变为

$$\Phi_{xx} + \Phi_{yy} - 2A\Phi_x - 2B\Phi_y = -S_\Phi \quad (7)$$

对此采取剖开算子法, 并采用混合有限分析法的五点格式, 将求解方程转化为

$$\Phi_p = C_W \Phi_W + C_E \Phi_E + C_S \Phi_S + C_N \Phi_N + C_p S_{\Phi,j} \quad (8)$$

2.2 用动态链接库进行一次封装

水力数值模拟大多采用 Fortran 编程。Fortran 新的集成开发环境(如 Fortran PowerStation 4.0)提供了对动态链接库的支持,建造动态链接库既利用了现有的 Fortran 程序资源,又为程序交互奠定了基础。用动态链接库封装水力数学模型,将执行各计算任务的例程集成到动态链接库中,以便组件编程语言能够对库例程实施调用。上述湍浮力射流模型可大致划分三个外部例程:生成计算区域的数值网格、赋初边值条件和迭代求解转换后的一系列代数方程。迭代求解外部例程又调用了执行各子任务的内部例程:引入摩阻速度、压力修正(采用交错网格)和壁函数,得出五点格式方程系数,求解三对角矩阵,得出速度场、压力场和湍动能、湍动能耗散及温度场,最后计算质量残差(连续方程),并以此控制方程的迭代求解。

将上述众多例程集成到动态链接库中,应特别注意外部例程的属性声明:除了必须进行库例程的导出(DLLEXPORT)声明外,还应明确规定例程使用的调用约定、例程名和参数列表^[5]——列表的参数顺序、参数传递属性(引用传递或值传递)和参数数据类型,以便组件编程语言对外部例程实施调用时予以协调。

2.3 用组件进行二次封装

水力数学模型的二次封装,实际是将上述动态链接库中的外部例程转化为组件对象接口的方法实现:湍浮力射流的生成数值网格、赋初边值条件和迭代求解。和通常的子程序或函数一样,方法一般也有参数,将网格定义参数、初边值条件和待确定的数学模型计算参数,设置成相应方法的引用参数,以便在外部通过操作界面对这些参数作出调整。在组件对象内部,先声明和动态链接库相对应的外部例程原型(导入动态链接库),再在相应接口的方法中对外部例程实施调用。至此,基本完成了水力数学模型的二次封装。

水力数值模拟可视化的关键在于:在数值模拟执行的过程当中,用于计算的组件对象不断地将中间结果数据传递出来,主控程序接到此数据后立即开展可视化图形显示;另一方面,依据可视化反馈信息,随时暂停或中止数值计算,在对模型有关参数作出调整后,恢复或重新进行数值计算。自动化组件对象的另一类接口成员——事件(组件对象引发的动作)就担此重任:在组件对象迭代求解方法的适当位置引发事件(事先需进行事件声明),将计算中间结果——速度场、温度场、湍动能等设置成事件的值参数,这样,组件对象在向外发出事件通知的同时,也将中间结果传了出来;另外,在事件的参数列表中,设置特别的逻辑引用参数,来标识计算的暂停或中止,并在组件对象引发事件后,对这一参数进行检查。通过事件这一双向通讯机制,数值计算既能实现跟踪处理——实时、动态地显示计算过程的中间结果,又能被有效地驾驭。

3 系统实现

采用 Visual Basic 6.0 开发水力数值模拟可视化系统:在系统功能中,数值计算已在上节探讨过;图形绘制, Visual Basic 调用 Windows 的图形设备接口(GDI);数据存储, Visual Basic 调用 ActiveX 数据对象(ADO)、驱动 Jet 数据库(桌面数据库);操作界面和主控程序直接用 Visual Basic 创建;操作系统采用 Windows NT 4.0(或 Windows 95/98);硬件平台选择高档 PC 机,在初步研究阶段,先在单机环境下实现可视化系统。

3.1 组件实现及工作流程

按前述组件编程模型, 将水力数值模拟可视化系统划分成以下五个功能独立的组件: 模拟计算组件, 执行与数学模型有关的各种算法; 数据存储组件, 存储计算的中间结果; 数据转换组件, 将计算数据转换为绘图用的几何数据; 绘图组件, 绘制各特征量的变化图形; 输出组件, 以列表和图形方式输出计算结果。其中, 数据存储、绘图和输出组件只设有执行特定操作的方法, 模拟计算和数据转换组件还设有事件, 模拟计算组件的事件具有双重作用: 一是向外发出数据通知; 二是控制模拟计算的执行。上述各独立组件统一被主控程序所调用。

系统的工作流程是, 主控程序调用模拟计算组件执行计算, 并在计算过程中不断发出事件通知, 主控程序接到计算组件事件到达的通知时, 调用存储组件存储计算的中间结果, 与此同时, 调用转换组件将计算数据转换为几何数据, 转换完毕, 主控程序便接到转换组件发出的事件通知, 然后, 它调用绘图组件在屏幕上绘图。

流入转换组件的数据有二条途径: 在计算执行的过程当中, 数据直接来自于计算组件发出的事件通知, 因而, 系统能够实时、动态地绘制计算过程中各特征量的变化图形; 当计算暂停或中止时, 计算组件的事件通知已不可用, 转换组件的入口数据从数据库中提取。这样一来, 不但计算过程中各特征量的变化图形得以实时展示, 而且, 计算过程在不同迭代步、不同断面上各特征量的图形切片也得以交互。

3.2 系统操作

系统运行时, 点击“网格生成”按钮, 系统按缺省的网格定义生成数值网格, 并在屏幕上予以展示; 点击“模拟计算”按钮, 系统按缺省的周界条件和模型参数进行模拟计算, 计算过程的中间结果被实时地转变成屏幕上不断变化的图形。通过观察可视化图形, 若对生成的网格不满意, 如: 喷口附近需局部加密, 可调整网格定义参数, 重新生成数值网格; 通过察看计算过程展示的动态图形, 若发现趋势不合理, 或要考察个别参数的影响, 或要进行不同工况下的对比计算, 可点击“暂停计算”或“中止计算”按钮, 在模型参数对话框中重新设置有关的参数, 并进行新的模拟计算。在计算暂停或中止时, 也可点击“交互图形”按钮、打开设置对话框, 选择展示已进行的模拟计算过程中任一迭代步、任一断面上特征量的图形切片。此时, 也可点击“输出”按钮、选择输出不同的结果图形或列表。

3.3 可视化信息反馈

水力数值模拟可视化, 旨在通过各个模拟过程的可视化信息反馈, 对水力数学模型有一个全方位的透视, 借此获得对水力数学模型规律的深刻认识。下面“以点概面”, 通过剖析可视化系统的一个侧面, 来了解水力数值模拟可视化系统的整体功能。

用 $F_0 = T_a u_0^2 / [(T_0 - T_a) g B]$ 表示喷口密度弗劳德数, $R = u_a / u_0$ 表示横流与射流的流速比, 对 $F_0 = 75$, R 分别为 0.2 和 0.4 的两种工况进行对比计算, 重点考察横断面上速度 u 、温度 T 及湍动能 k 的分布情况。其可视化信息表明, 当流速比 R 较小时, 在喷口下游附近形成一明显的回流区 ($R = 0.2$ 的情形), 随着 R 的增大, 回流区逐渐减小; 在喷口附近, 由于动量较大, 使得离喷口较近的断面速度加大, 随着距喷口距离的增大, 最大速度逐渐减小直至接近横流速度。对于较小的流速比 R , 由于横流作用较弱, 在喷口附近射流能卷吸更多的环境水体, 从而与环境水体充分掺混, 使得温度与湍动能扩散到较高的位置, 且随着距喷口距离的增大, 温度与湍动能沿程减小。

4 结 论

(1) 由于涉及混合语言编程, 我们进行了对比验证: 先进行传统的水力数值模拟(湍浮力射流), 然后才正式开发水力数值模拟可视化系统。该系统的运行情况表明, 两者的数值结果完全吻合。

(2) 水力数值模拟可视化, 不只是数值模拟方式上的改变, 它还水力数学模型的研究与应用提供了透视手段, 对深入认识水力数学模型规律起到了催化作用。

(3) 组件编程模型不仅能实现驾驭式计算, 而且, 它还为系统构造了伸缩性极强的框架体系, 使系统能够随水力数学模型自身的发展, 不断加以充实和完善。

(4) 本文的研究工作对其它领域的可视化或应用系统的开发, 具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 石教英, 蔡立文. 科学计算可视化算法与系统[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] 张海藩. 软件工程导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [3] Mary Kirtland. 基于组件的应用程序设计[M]. 北京博彦科技发展有限公司译. 北京: 北京大学出版社, 1999.
- [4] 韩会玲. 横流中线源型浮力射流的数值预报[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1998.
- [5] 周振红, 杨国录, 周洞汝, 等. FORTRAN 与 VISUAL BASIC 混合编程的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 1(2): 85-87.

Numerical hydraulic modeling visualization system based on software component*

ZHOU Zhen hong¹, YANG Guo lu¹, ZHOU Dong ru²

(1. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: By traditional numerical hydraulic modeling, the nature of numerical hydraulic model is hardly revealed. This paper makes a new study for the way in which numerical hydraulic modeling is carried out, choosing up-to-date component programming model in software project to encapsulate numerical hydraulic model. In such a way, the visualization in numerical hydraulic modeling process is implemented. On the other hand, the numerical computation is steered according to the feedback information of visualization.

Key words: numerical hydraulic modeling; visualization; component object model

* The project is supported by National Natural Science Fund of China (No. 50099620).