水沙数学模型与可视化系统的集成研究

左利钦，陆永军

（南京水利科学研究院，水文水资源及水利工程科学国家重点实验室，港口航道泥沙工程交通行业重点实验室，江苏 南京 210029）

摘要：基于VC++平台开发了二维水沙数学模型与可视化的集成系统（NHRS-2D），给出了系统中关键环节的处理方法，包括计算模块以Fortran生成动态链接库（DLL）的形式集成到系统中；以读写DXF文件的方式与AutoCAD实现了互接；多线程编程等. 该系统包括前处理模块、计算模块及后处理模块3个部分. 前处理模块具有正交曲线网格的生成、绘制、地形数据的摘取等功能；计算模块可进行河道水沙数值计算、河口海岸潮流泥沙计算及波-流共同作用下的泥沙计算等，并实现了计算过程的实时显示；后处理模块实现了流场、流线、含沙量场、河床（海床）变形等动态可视化的制作和显示，并能以AutoCAD的形式实现流场、等值线图的绘制等. 系统采用Windows风格的菜单、工具栏及窗口操作，界面友好，可视化程度高.

关 键 词：水沙数学模型；集成系统；可视化；动态链接库；前处理模块；计算模块；后处理模块
中图分类号：TV142∶O242.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-640X(2007)04-0001-08

Integration of flow-sediment mathematical model and visualization system

ZUO Li-qin, LU Yong-jun

(*State Key Laboratory of Hydrology, Water Resourses and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Port, Waterway and Sediment Engineering of MC, Nanjing Hydraulic Reserch Institute, Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: An integrated system of flow-sediment mathematical modeling and visualization is established based on VC++language. Some key methods are: the mathematical models are integrated by dynamic link libraries (DLL) created by Fortran language; the integrated system makes linkage with AutoCAD with DXF file; the multithreading is used in the program and so on. Then an integrated system is finished (NHRS-2D), which contains a preprocessor module, a calculation module, and a post-processing module. The preprocessor module provides creation and draw of orthogonal curvilinear coordinate grid. Another main function of the preprocessor module is that terrain data on every gird node can be got from AutoCAD. The calculation module is adapted to river, estuarine and coastal areas. As for rivers, steady flow and sediment movement can be simulated. As for estuarine and coastal areas, tidal current and sediment transport under action of tide or both tide and wave can be simulated. Real time visualization is applied while calculating. The post-processing module applies the function of facture and show of dynamic visualization for velocity field, flow streamline, sediment concentration field, and river (sea) bed deformation, etc., and also the function to draw velocity field and isoline pictures in AutoCAD. The system has a friendly interface and nice visualization, with menus, toolbars and forms similar to Windows'.

Key words: flow-sediment mathematical model; integrated system; visualization; dynamic link libraries; preprocessor module; calculation module; post-processing module

收稿日期：2007-01-22
基金项目：国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB415206)，国家自然科学基金资助项目(50379027)
作者简介：左利钦(1980-)，男，山东巨野人，硕士，主要从事河流海岸动力学及泥沙运动研究. E-mail: lqzuo@163.com

随着计算机水平的提高,多媒体技术、图像处理技术、大型关系数据库技术、组件技术、3S 技术(GIS/GPS/RS)、多语言混合编程技术等迅速发展,它们与计算技术的结合为数学模型的发展提供了新的机遇. 集成式数学模型是将前处理(建模)、计算和后处理有效地连接起来,形成一个有机整体,采用窗口向导式建模,界面友好,显示手段丰富. 同时,前处理、计算和后处理数据结构的统一大大提高了数模开发效率,对数学模型的推广和应用具有重要意义.

近年来,国外出现了一些以水流、泥沙、水质等为模拟对象的集成软件. 如荷兰的 Delft3D、丹麦的 DHI 系列软件、美国的 SMS、加拿大的 DALCOAST、英国的 Wallingford 等. Delft3D 是荷兰水工研究所研发的模拟系统,适用于河流及河口海岸地区,可以模拟水动力、波浪、泥沙输移、地形演变、水质、水质颗粒追踪、生态等[1]. DHI(丹麦水工研究所)推出了一系列的数值模拟软件,涉及与水有关的许多方面,包括降雨径流、河流模拟、海岸、河口工程及环境等[2]. SMS 提供了多维有限元和有限差分数值模型,可用于河道水沙数值模拟,径流、潮流、波浪共同作用下的河口和海岸的水沙数值模拟,在计算自由表面流动方面具有强大的功能[3]. DALCOAST 河口海岸预报系统由加拿大达尔豪斯大学研制而成[4],适用于沿海风暴潮以及三维流场的数值模拟和预测预报,可以提供风暴潮、三维流场以及三维温度和盐度场的 24 h 后报和 48 h 预报. 英国的 Wallingford 公司也推出了一系列适用于河流、海岸及供水系统的软件产品[5].

国内数值模拟集成系统方面的研究起步较晚,近年来的研究主要集中在高级语言编程、组件技术、GIS 集成等方面. 在高级语言编程方面,朱松林等[6]开发了用于三维复杂区域流场数值模拟的驾驭式可视化软件;辛文杰等[7,8]研制开发了"滨海、河口电厂取排水口冲淤变化数学模型"软件包;方春明等[9]建立了可视化河网一维恒定水流泥沙数学模型;张细兵等[10]采用 Fortran 和 VB、VC 语言混合编程技术,研制了平面二维可视化数学模型及动态演示系统;张尚弘[11]采用 VC++平台集成,后台数学模型由 Fortran 语言编写,两者之间运用管道传输与事件触发机制实现数据传输,实现了数模计算与虚拟仿真相结合的实时交互功能;王玲玲等[12]研制了三峡工程永久船闸输水系统水力特性数值实验室,采用了多种计算及图形软件如 Fortran、C、LIST、AutoCAD、VB、VC、3Dmax 等,完成了数值计算、数模成果同步演示、动画制作、界面设置等工作;李孟国等[13]开发了适用于海岸河口地区的 TK-2D 数学模型软件包;罗小峰[14]在 VC++环境下开发了一套适用于大型河口和复杂海岸的数值模拟可视化系统,集成了平面二维水流、盐度、泥沙模型和三维水流盐度模型,实现了从建模、计算到后处理的全程可视化. 在组件技术方面,叶清华[15]将组件技术应用于海岸工程数学模型,建立了以平面二维潮流数学模型计算组件为核心,以 GIS 组件为可视化环境,后台以关系数据库支持的紧密集成的海岸工程数学模型系统;周振红等[16]将 Fortran 计算程序做成动态链接库,采用组件化编程的方式解决数据传输与控制的问题,建立了基于组件的水力数值模拟可视化系统. GIS 集成方面,尹海龙等[17]采用可视化编程工具 Visual Basic 和 MapX 控件,用水环境数学模型和 GIS 集成的方式设计开发了中文可视化用户界面下的黄浦江水环境数学模型.

总体来说,国外知名商业软件的水流部分相对比较成熟,但泥沙部分因公式选用、参数选取等方面的问题尚未在中国得到有效应用. 国内的数值模拟软件集中在河流或河口海岸的单一地区,缺少一个综合性的适用于河道和河口、海岸地区的模拟系统,且水流模拟与可视化集成系统研究相对较多,泥沙模拟与可视化集成系统研究相对较少. 本文建立了适用于河道及河口、海岸地区的水沙数值模拟系统,包括前期处理、计算模块及后处理 3 个部分. 其中计算模块采用贴体正交曲线坐标系下的二维水流、泥沙数学模型及波流共同作用下二维泥沙数学模型,其基本方程、数值解法、初始条件、边界条件、动边界技术及关键问题的处理等详见文献[18-21].

1 系统集成中关键环节的处理

集成系统的开发基于 VC++平台. 为充分利用 Fortran 语言强大的计算能力并考虑到以前大部分计算程序采用 Fortran 编写,计算模块采用 Fortran 生成 DLL(动态链接库)的形式集成到系统中,这样有 3 个优点:①充分利用 Fortran 语言强大的计算功能;②将 Fortran 与 Visual C++有机结合,混合编程;③实现了代码封装,扩充性好、移植性好. 为实现系统的实时显示,采用基于文件的通信方法实现 VC++和 Fortran 的实时通信. 鉴

于 AutoCAD 软件的广泛应用，集成系统和 AutoCAD 实现了互接，以方便在 AutoCAD 里提取、书写数据及图形等. 同时采用多线程编程技术，提高了程序运行效率.

1.1　Fortran 与 VC++混合编程

采用 VC++调用由 Fortran 生成的动态链接库，实现二者的混合编程. 这样既可以使多个应用程序，甚至是不同语言编写的应用程序共享一个 DLL 文件，实现“资源共享”，缩减应用程序的执行代码，有效利用内存；又可在 DLL 文件作为应用程序的独立模块设计时，可以把一些常规的例程独立出来，避免不必要的重复开发，提高软件的开发速度，为软件升级提供方便[22].

1.1.1　*Fortran 生成动态链接库*　Fortran 可以在 Power Station 及 Visual Fortran 的环境中创建动态链接库. 对于原有的代码，只需加 DLL 输出标识，就可编译生成 DLL. 下面举一个简单的例子介绍在 Visual Fortran 6.5 的环境中生成动态链接库的具体步骤.

运行 Developer Studio，在 Project 类型里选择“Fortran Dynamic Link Library”建立“A Dll application with exported symbols”工程（本例工程名为 test），即可生成一个有 DLL 输出标识的工程.

打开工程，在 test.f90 中添加如下代码：

```
subroutine TEST(a,b,c)                                    //实现 c=a+b 的子程序
    !DEC$ ATTRIBUTES stdcall, DLLEXPORT::TEST             //进行导出函数的声明
    !DEC$ ATTRIBUTES ALIAS:'TEST'::TEST                   //限定过程名为 TEST
    !DEC$ ATTRIBUTES VALUE::a,b                           //a,b 变量为传值方式
    !DEC$ ATTRIBUTES REFERENCE::c                         //c 变量为传地址方式
    real*8 a,b,c                                          //定义变量为浮点型
    ! Body of TEST
    c=a+b                                                 //子程序体
end subroutine TEST
```

进行编译，即可生成 TEST.dll 和 TEST.lib 文件.

$ATTRIBUTES 是 Fortran 中的元命令，用于声明微软扩展属性. DLLEXPORT 属性表明该函数或子过程能被其他程序或 DLL 调用，只有声明了 DLLEXPORT 属性，才能从 DLL 中导出过程，该过程也才能为外部程序所调用. 将上述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——列表的参数顺序、参数传递属性（引用传递或值传递）和参数数据类型等[23]. 本例调用约定采用默认的 STDCALL，以便其他语言工具以使用 Windows API 的方式来调用这里的输出过程. TEST 为子过程名称. ALIASNAME 是函数或子过程的别名. ALIAS 属性是以防 NAME 中出现 VC 不可识别的字符. 在缺省情况下，Fortran 语言的程序的标识符无论大小写，在编译后均被处理为大写并被加上下划线作为前缀，对于子过程名在编译后还要加上@n 作为后缀，n 是子过程参数在堆栈中占据的总的字节数. 使用 VC++中的 dumpbin.exe 可查看生成的文件名，在 DOS 环境下，进入到 dumpbin.exe 所在目录，运行命令 dumpbin/exports TEST.dll 即可看到生成的子过程或子函数名. 需注意的是 dumpbin.exe 必须和 link.exe、mspdb60.dll 联用.

1.1.2　*VC++调用动态链接库*　VC++调用 Fortran 生成的 DLL 文件有隐式链接（Implicit linking）和显式链接（Explicit linking）[24]两种方式. 隐式链接是指在应用程序开始执行时就将 DLL 文件加载到应用程序中，这样使用的代码少，但占用的系统资源多；显式链接可以完全控制 DLL 的载入和释放，以最有效地利用系统资源. 本文采用显式链接方式调用 DLL. 显式链接时，VC++通过 3 个函数实现对 DLL 的控制，即 LoadLibrary、GetProcAddress 及 FreeLibrary 函数[25].

用上述 Fortran 生成的 DLL 文件为例，介绍显式链接调用过程：

```
typedef void(_stdcall *_stdcall lpProc1)(double,double,double*);
HINSTANCE hLibrary;
lpProc1 Proc1;
double c;
```

```
hLibrary = LoadLibrary( "TEST. dll" );
if( hLibrary! = NULL)
{
    AfxMessageBox( "Load TEST. dll sucessed!" );
    Proc1 = ( lpProc1 ) GetProcAddress( hLibrary, "TEST" );
    if( Proc1! = NULL)
    { Proc1( 1.0, 2.0, &c );}
}
    FreeLibrary( hLibrary );
```

链接前,建议先把 DLL 文件拷贝到应用程序所在目录. 本例中,首先使用类型定义关键字 typedef 定义指向和 DLL 中相同的函数原型指针,HINSTANCE 用来存放文件句柄,用 LoadLibrary( ) 函数将 DLL 加载到当前的应用程序中,并返回 DLL 文件的句柄,然后使用 GetProcAddress( ) 函数获得调用导入到应用程序的函数指针,并通过该指针调用 DLL 中的导出函数. 使用 DLL 后,调用 FreeLibrary( ) 函数卸载 DLL. 运行程序,可得到 c = 1.0+2.0 = 3.0.

1.2 基于文件的通信方法

为了实现系统的实时显示,必须实现 VC++和 Fortran 的实时交互通信. 在 DLL 函数中可以通过参数传递实现 DLL 与调用程序的数据传输. 但传输的数据量比较大时,使用这个方法会影响 DLL 模块的计算效率. Windows 的管道技术也可以实现各个模块之间的数据传输,但因其是在内存中开辟缓冲区,每次向管道写入的数据量不宜太大,否则容易造成写入阻塞而使传输中止[11]. 本文采用基于文件的通信方式实现 VC++显示窗体与 DLL 的数据传输,简单便捷,不影响 DLL 的执行效率.

基于文件的通信,是指 DLL 计算过程中的信息写入到一个中介信息文件,VC++不停读取中介信息文件中的信息,在实时显示中调用. 这个过程中涉及到两个关键问题:文件接口约定和文件共享机制. ①文件接口实际上就是程序或程序按对方要求生成的数据文件格式,它的约定就是数据文件格式的定义. 通信双方约定共同的文件格式,以便能正确调用. 中介信息文件是在 DLL 模块执行过程中生成的,模块每执行完一个时间步长,就更新中介信息文件,并传递给 VC++调用. ②由于通过文件来实现交互通信,因此必须保证文件的正确性. 这不仅要保证生成数据文件的源程序本身的正确性,还要防止文件共享时程序员本人或其他应用程序无意的破坏.

1.3 多 线 程

多线程是多任务的一种. 多任务就是使多个应用程序执行计算密集型任务,并让所有的应用程序在每个任务上都有等量的进展. 其优点是防止单个应用程序过多占用处理器致使其他应用程序困在等待状态中[25]. 采用多线程实现多任务,即一个进程从主线程的执行开始进而创建一个或多个附加线程.

线程是进程的一条执行路径,把多个任务放在不同的线程中可充分利用 CPU 时间,最大限度地提高程序的运行效率,从而提高程序的运行速度. Windows 提供了函数 AfxBeginThread 来启动一个线程,定义如下[26]:

```
CWinThread * AfxBeginThread(
    AFX_THREADPROC pfnThreadProc,                    //线程函数地址
    LPVOID pParam,                                   //传给线程的参数指针
    Int nPriority = THREAD_PRIORITY_NOMAL,           //设定优先权
    UNIT nStackSize = 0,                             //线程堆栈的大小
    DWORD dwCreateFlags = 0,                         //创建线程的额外说明
    LPSECURITY_ATTRIBUTES lpSecuityAttrs = NULL      //安全属性
);
```

通常线程函数结束之后,线程将自行终止,CWinThread 类完成结束线程的工作. 如果在线程的执行过程中程序员希望强行终止线程的话,则需要在线程内部调用 AfxEndThread(nExitCode),其参数为线程结束码.

这样将终止线程的运行，并释放线程所占用的资源.

在系统构建过程中，为兼顾计算和实时显示，将计算模块放到一个新建线程中，并设定为正常优先级（根据需要可以更改设置），主线程用来响应新建线程的消息，处理各种窗口命令、实时显示等其他事件.

1.4　与 AutoCAD 的连接

AutoCAD 是一个优秀的计算机辅助设计软件，在工程设计及其他领域得到广泛应用. 本文利用 AutoCAD 图形标准数据交换格式 DXF 格式，实现系统与 AutoCAD 的连接，提供了写和读取 DXF 文件信息的功能. 例如，绘制一条从点(0,0,0)到点(100,100,0)的直线，需要使用“实体段”选项，产生的文件包括实体段及段的结尾. 其代码为：

(1)开始实体段

```
0
SECTION
2
```

(2)标题段

```
ENTITIES  //  实体
0
POLYLINE //多线段
 8     //      层名
7
 62     //     颜色
0
 66   //   "entities follow"  标记
```

```
 1
10
0
20
0
30
0
 VERTEX
```

(3)画线(0,0,0)(100,100,0)

```
//定位（0，0，0）
8
7
10
0
20
0
30
0
VERTEX
```

```
//定位（100，100，0）
8
7
10
100
20
100
30
0
VERTEX
```

(4)文件结束

```
//结束实体段
0
ENDSEC
0
EOF //文件结束
```

用 AutoCAD 打开上述绘制的后缀为. dxf 的文件可以看到一条(0,0,0)至(100,100,0)的直线. 同样的方法，可以实现其他复杂操作，例如绘制流场、等值线图等，以及提取 CAD 图形中各种信息（坐标值、地形数据、颜色等）.

2 水沙数值模拟系统的集成(NHRS-2D)

在前文关键环节处理的基础上,基于 VC++平台开发了二维水沙数值模拟系统(NHRS-2D),并提供数值模拟的前处理、计算及后处理等功能. 前处理包括贴体正交曲线网格的生成、绘制以及地形数据的摘取等数学模型计算中经常用到的功能;计算模块采用前文所述的 DLL 技术,实现了计算代码的封装,包括二维河道水沙计算、二维河口海岸潮流、泥沙计算和波-流共同作用下的潮流、泥沙计算,计算参数设置界面化,提供实时水文要素验证、实时流场、含沙量场等动态显示等功能,可以随时了解计算过程,实现了交互式数学模型的目标;后期动态显示提供了流场、流线、含沙量场以及河床(海床)冲淤变形等静态图、动态图的绘制、播放,其中流场图包括欧拉场、拉格朗日场. 图 1 为系统总体框架.

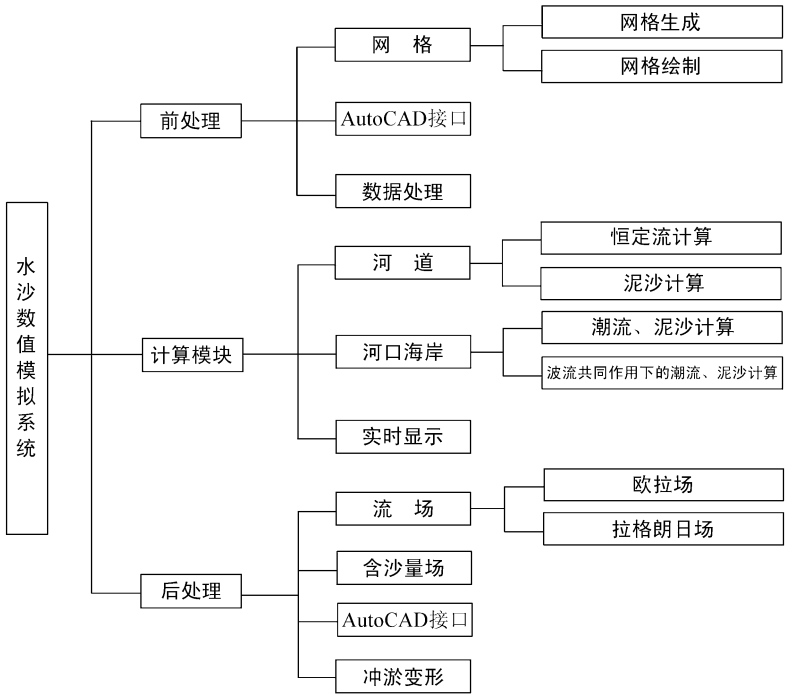

图 1 水沙数值模拟系统框架

Fig. 1 Sketch frame of flow-sediment simulation system

2.1 前处理模块

前处理模块提供了贴体正交曲线网格的生成,生成原理为求解 Possion 方程[27]. 采用上节所述的 DXF 方法连接 AutoCAD,提供 AutoCAD 地形数据的读取、插值、网格图及等值线图绘制等功能.

2.2 计 算 模 块

计算模块采用前文所述的 DLL 技术,实现了计算代码的封装,包括二维河道水沙计算、河口海岸潮流泥沙计算、河口海岸波-流共同作用下的泥沙计算;计算的重要参数实现了窗口化,如网格尺度、时间步长、糙率、松弛系数等;可以提供实时水文要素验证、实时流场、含沙量场等动态显示等功能,随时了解计算过程,实现了交互式数学模型的目标.

图 2 为其中的一个计算参数设置窗口,图 3 为计算过程监视. 图 2 中,NX 表示 ξ 方向的网格数,NY 表示 η 方向的网格数,NE 表示计算变量的个数,LH 表示计算小时数,n 表示基本糙率值,DT 表示时间步长,NPRINT 表示输出结果的时间步长数,ERR 表示所允许的最大误差,AFA 表示紊动系数,RELAX 表示松弛系数,Relax1、Relax2、Relax3 分别表示计算时 H(水位),u(ξ 方向的流速),v(η 方向的流速)所对应的松弛系数,Ntimes1、Ntimes2、Ntimes3 分别表示计算时 H,u,v 的迭代次数,其他参数为数组定义的需要而设置. 图 3 中左侧为计算过程监视窗口,监视每个时间步长的收敛情况,右侧为计算潮位过程,实线表示潮位全过程,点

表示当前计算时刻的潮位.

实时可视化的意义在于能够在计算过程中查看水文要素的验证、流场、含沙量等变化情况,可以随时了解计算过程从而进行干预,对模型调试意义重大. 朱松林等[6]提出了实时可视化的概念,并应用于三维复杂区域流场数值模拟的驾驭式可视化软件中;罗小峰[14]在其河口海岸水沙盐数值模拟系统中也进行了计算可视化的实践. 实时可视化在洪水预报、水文预报等领域应用广泛,但在计算量巨大的水流、泥沙、盐度、水质等方面还属于尝试阶段,随着以后计算机性能的提高及相关数学模型算法的改进,实时可视化的发展使得流场、含沙量场、河床(海床)冲淤变形等要素的即时预报将成为可能. 动态流场图需要 20 ~ 30 帧/min 的速度才顺畅,计算模块的时间步长一般为 5–10 s,这就涉及到数据的插值和图片的存储、读取问题,从而使得实时动态的绘制占据内存较大. 从计算效率考虑,本系统每分钟给出一幅当前时刻的流场、含沙量等图形进行叠加,用以实现动态显示,并达到用户与系统的交互效果,节省了大量的内存和时间. 当然,调试人员可以根据实际情况设置绘制流场的时间间隔.

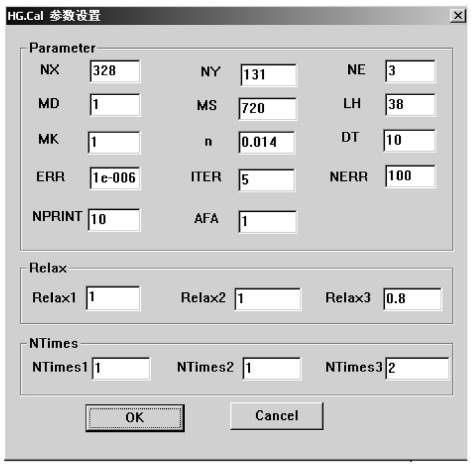

图 2　计算参数设置窗口

Fig. 2　Window for setting calculation parameters

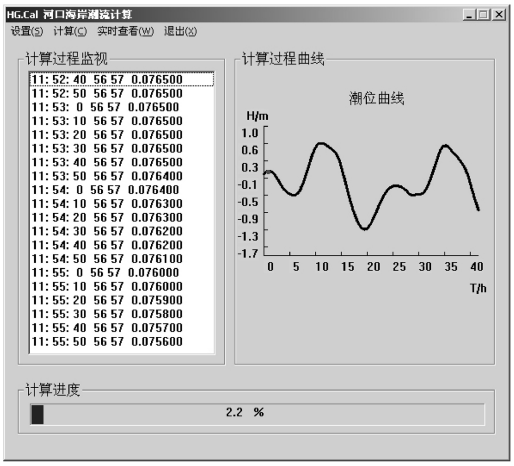

图 3　计算过程监视窗口

Fig. 3　Window for watching calculation process

2.3　后处理模块

后处理模块采用 VC++底层开发的方式,实现了流场、流线、含沙量分布、河床(海床)冲淤变形等动态显示的生成、播放,其中流场包括欧拉场及拉格朗日场两种形式. 为方便报告编写还提供了相应静态图的绘制. 鉴于目前地形资料、工程方案等大多使用 AutoCAD 软件,提供了在 AutoCAD 读取、输出数据,绘制流场、等值线图等功能.

集成系统在“三峡水库运行初期对嘉陵江北碚河段的影响及航道整治措施研究”及“珠江口磨刀门出海航道整治研究”中得到应用[23],前者是系统中河道模块的具体应用,后者是河口海岸模块的具体应用,均取得了良好的效果.

3　结　语

基于 VC++平台,采用以 Fortran 生成动态链接库(DLL)的形式调用计算程序和多线程编程技术等处理方法,形成了包括前处理模块、计算模块、后处理模块的可视化集成系统(NHRS-2D),并且以读写 DXF 文件的方式与 AutoCAD 实现了连接.

该集成系统在河道与河口海岸地区的具体应用中取得了良好的效果,但还属于初步开发阶段,在通用性、操作性、集成手段多样化、商业化等方面还有待继续优化. 该系统目前只提供二维水流、泥沙的模拟,有关盐度、温度等方面的模拟与三维计算功能还需进一步完善. 就动态可视化部分而言,二维可视化技术相对成熟,三维可视化技术尚处于探索阶段. 在三维的开发上,OpenGL 具有强大的功能,与之结合进行三维开发是以后的发展方向.

参 考 文 献:

[1] Delft3D-flow user′s manual[K]. Delft: WL Delft hydraulics, 2001.

[2] 程海云, 黄 艳. 丹麦水力研究所河流数学模拟系统[J]. 水利水电快报, 1996, 17(19): 24-27.

[3] 鲁海燕. SMS 模型在杭州湾潮流模拟中的应用[J]. 浙江水利科技, 2003, (3): 4-6.

[4] http://www. phys. ocean. dal. ca/dalcoast/Dalcoast1/exper/index. html

[5] http://www. wallingfordsoftware. com. cn/products/rivers. asp

[6] 朱松林, 印霞隽. 复杂区域流场计算的驾驭式可视化软件开发[J]. 计算机辅助工程, 1996, (2): 34-39.

[7] 辛文杰, 罗小峰. 滨海、河口电厂取排水口冲淤变化数值模拟系统研发报告[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2002.

[8] Wenjie Xin, Xiaofeng Luo. Visualization Simulation System in Coastal and Estuarine Areas[C]//US-CHINA Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydroscience & Engineering. Oxford: Mississppi, 2005.

[9] 方春明, 鲁 文, 钟正琴. 可视化河网一维恒定水流泥沙数学模型[J]. 泥沙研究, 2003, (6): 60-64.

[10] 张细兵, 龙超平, 李线纲. 可视化数学模型及动态演示系统的初步研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 21-28.

[11] 张尚弘. 都江堰水资源可持续利用及三维虚拟仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

[12] 王玲玲, 戴会超, 王 琼. 三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 100-103.

[13] 李孟国, 张华庆, 陈汉宝, 等. 海岸河口多功能数学模型软件包 TK-2D 的开发研制[J]. 水运工程, 2005, (12): 1-4.

[14] 罗小峰. 河口海岸水盐沙数值模拟系统研究及应用[R]. 武汉: 武汉大学, 2006.

[15] 叶清华. 组件式海岸工程数学模型集成系统的开发与应用[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.

[16] 周振红, 杨国录, 周洞汝. 基于组件的水力数值模拟可视化系统[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 9-13.

[17] 尹海龙, 徐祖信. 可视化黄浦江水环境数学模型系统设计与开发[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(1): 5-11.

[18] 陆永军, 袁美琦. 潮汐河口二维动床紊流模型[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 151-158.

[19] 陆永军. 航道工程泥沙数学模型研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 1998.

[20] 陆永军, 左利钦, 王红川, 等. 波流与潮流共同作用下二维泥沙数学模型[J]. 泥沙研究, 2005, (6): 1-12.

[21] Lu Yongjun, ZuoLiqin, Shao Xuejun , *et al*. A 2D Mathematical Model for Sediment Transport by Waves and Tidal Currents [J]. **China Ocean Engineering**, 2005, 19(4): 571-586.

[22] 赵震宇, 王喜臣. C/ C#与 FORTRAN 混合编程技术及其应用研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 197-200.

[23] 左利钦. 水沙数学模型与可视化系统的集成研究及应用[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.

[24] 方 莉, 林中达. 关于 DLL 的 VC#程序编程方法[J]. 上海电力学院学报, 2001, 17(4): 51-54.

[25] Davis Chapman. 学用 Visual C#6.0[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[26] 肖宏伟. Visual C#实效编程百例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.

[27] Willemse J B T M, Stelling G S, Verboom G k. Solving the Shallow Water Equations with an Orthogonal Coordinate Transformation[C]//Delft Hydraulics Laboratory. Int Symp on Computational Fluid Dyn. Delft: Delft Hydraulics Laboratory, 1986.