

· 信息技术 ·



## 基于 CAD 二次开发的流场可视化研究

黄 菊<sup>1</sup>, 童思陈<sup>1,2</sup>, 孙 开<sup>3</sup>, 蒋聘凤<sup>1</sup>, 张倩倩<sup>1</sup>, 王 祥<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术中心, 重庆 400074;  
3. 贵州乌江水电开发有限公司乌江渡发电厂, 贵州 遵义 563104)

**摘要:** 水动力流场计算是水利工程及航道整治工程研究中涉及的重要内容。为实现流场可视化自主研发和便于编辑, 提出一种基于 CAD 二次开发的流场生成及可视化方法。采用 Fortran 和 C# 的混合编程技术, 基于动态链接库, 通过 C# 与 Fortran 参数的传递, 对 AutoCAD 进行二次开发。该方法可以在 AutoCAD 平台上快速绘制流场矢量图和流场云图, 也可用不同颜色表示数值的大小, 从而实现流场的可视化编辑。以三峡库区长寿河段为例, 对该方法进行演示和应用, 结果表明其具有较好的可视化效果和实用价值。

**关键词:** 流场可视化; Fortran 语言; C# 语言; AutoCAD 二次开发

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0179-06

### Visualization of flow field based on CAD secondary development

HUANG Ju<sup>1</sup>, TONG Sichen<sup>1,2</sup>, SUN Kai<sup>3</sup>, JIANG Pinfeng<sup>1</sup>, ZHANG Qianqian<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074 China;  
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
3. Wujiangdu Power Plant of GuizhouWujiang Hydropower Development Co., Ltd., Zunyi 563104, China)

**Abstract:** Hydrodynamic flow field calculation is an important content in the research of hydraulic engineering and waterway regulation engineering. To realize independent research and development of flow field visualization and facilitate editing, a method of flow field generation and visualization based on CAD secondary development is proposed. Using the hybrid programming technology of Fortran and C#, based on dynamic link library, the secondary development of AutoCAD is carried out through the transfer of C# and Fortran parameters. This method can draw the flow field vector map and flow field cloud map quickly on AutoCAD platform, and can also represent the size of the value with different colors, so as to realize the visual editing of the flow field. The method is demonstrated and applied in Changshou River section of the Three Gorges Reservoir area, and the results show that it has a better visualization effect and practical value.

**Keywords:** flow field visualization; Fortran language; C# language; AutoCAD secondary development

在水利工程及航道整治中, 为了满足通航和防洪等要求, 需要计算河道和航道的流场数值, 并对流场进行分析。但仅从数值形式无法直观获取水流信息, 故流场可视化成为近年来研究的热点之一。流场可视化是通过图像或动画方式直观

呈现复杂的流动现象, 便于研究者更好地理解和分析流动过程中的规律和特性, 识别潜在的问题, 评估水流对于航道通行、水力结构物安全和洪水风险的影响, 及时采取措施降低风险。随着可视研究的不断深入, 已涌现出多种流场可视化方法。

收稿日期: 2023-09-13

作者简介: 黄菊 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 童思陈 (1973—), 男, 博士, 教授。研究方向为水力学及河流动力学、水利水电工程等。

E-mail: 81441849@qq.com

张细兵和毛冰<sup>[1]</sup>采用 VB 和 Fortran 语言对 Google Earth 进行二次开发, 得到箭头和云图形式的流场; Zhang 等<sup>[2]</sup>通过 Osgearth 平台以标量、矢量、视觉等多种方式实现了流场可视化; 徐威杰<sup>[3]</sup>基于 OpenGL 和 ArcGIS Engine 开发平台, 实现了海面动态三维可视化和海洋水体三维可视化; 李忠伟等<sup>[4]</sup>利用 Cesium 开发基于流线聚类数据的动态流场可视化应用, 适用于海洋的表面流; 李文达等<sup>[5]</sup>以图像为基础构建流场可视化模块, 开发浏览器/服务器结构的航道水流可视化平台; Zhao 等<sup>[6]</sup>首次利用 WebVR 技术, 采用示踪球和轨迹线描述三维流场。上述方法均依托于数据集或地形图片, 而河道流场的地形资料通常来源于 AutoCAD 的电子测量图, 目前基于 AutoCAD 实现流场可视化及其编辑的研究较少, 缺乏快速、直接、高效实现流场可视化的方法。AutoCAD 具有设计美观、修改高效的功能, 是实现可视化的便捷工具。

本文结合 Fortran 简洁高效和 C# 图形处理的优势混合编程, 通过动态链接库, 实现 C# 与 Fortran 参数的传递, 对 AutoCAD 进行二次开发, 可实现箭头和云图形式的快速、友好显示及编辑并通过颜色表示数值大小以及流场的等值线等功能, 从而实现流场的可视化及编辑。

## 1 基本原理

### 1.1 流场节点插值

虽然目前的商业软件能够提供离散化的流场数据, 但在离散节点上测量或计算流场时, 会导致流场的不连续性。插值可以通过适当的数学模型填充节点间的空白, 并将离散的数据转化为连续的流场, 使流场的变化更加连贯和平滑。为此, 本文采用 Delaunay 三角插值法对离散的流场数据进行插值处理。

#### 1.1.1 Delaunay 三角网格生成

Delaunay 三角剖分是一种将散点集合分割为规则三角形网格的方法, 具有固定且唯一的特性。它能够生成最接近规则化的三角网, 避免形成病态三角形, 且其边界与由点集形成的凸包相对应<sup>[7]</sup>。生成 Delaunay 三角网的算法包括插入法、

分治法和三角网生长法。插入法通过定位新加入点的位置并优化三角网, 然后逐个将剩余点插入三角形中以确保生成 Delaunay 三角网。该方法操作简单, 时间复杂度最大为  $O(N^2)$ , 在数据量较大时运行速度会增加。分治法将点集分割成多个子集, 再合并各子集上建立的三角网, 从而完成点集的 Delaunay 三角剖分, 其时间复杂度最大为  $O(N \lg N)$ 。三角网生长法则是在点集中搜索基边的第 3 个点以形成新的三角形, 并利用 Delaunay 三角网的局部性逐步减小点集规模以提高构网效率, 其时间复杂度最大为  $O(N^2)$ <sup>[8]</sup>。考虑到编码简易性和算法执行效率, 选用三角网生长算法<sup>[9]</sup>。假设平面上点集  $P$  包含 50 个点(图 1), 根据点集  $P$  生成的三角网具有 86 个网格(图 2)。

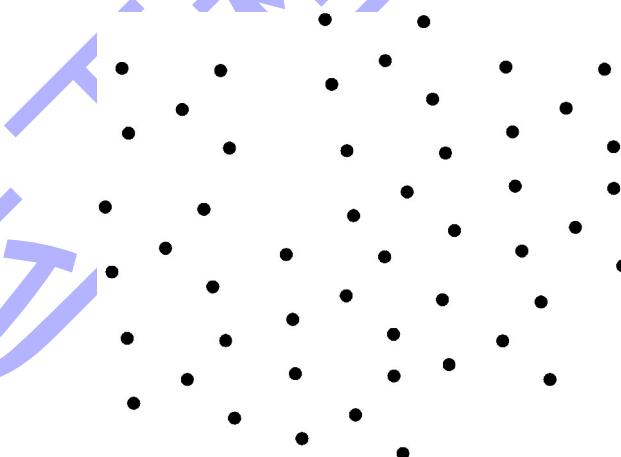


图 1 流场散点点集  $P$

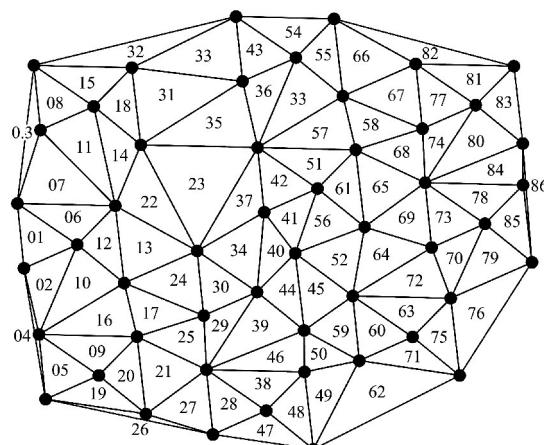


图 2 点集  $P$  生成的网格及编号

#### 1.1.2 节点插值

在 Delaunay 三角网中使用面积加权法进行插

值。如图 3 所示, 假设三角形的顶点坐标为  $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3)$ , 插值位置坐标表示为  $Q(x, y, z)$ 。在确定的三角形上, 根据插值位置与三角形顶点的相对位置, 以每个顶点所在三角形的面积与相应顶点的数值进行加权求和, 计算公式:

$$S=0.5 |(x_1(y_2-y_3)+x_2(y_3-y_1)+x_3(y_1-y_2))| \quad (1)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = (S_2/S_{ABC}) \\ \lambda_2 = (S_3/S_{ABC}) \\ \lambda_3 = (S_1/S_{ABC}) \end{cases} \quad (2)$$

$$z=\lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \lambda_3 z_3 \quad (3)$$

式中:  $S$  为三角形  $ABC$  的面积,  $S_1, S_2, S_3$  分别为 3 个小三角形的面积,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  分别为插值位置与 3 个顶点的相对位置,  $z$  为插值结果。

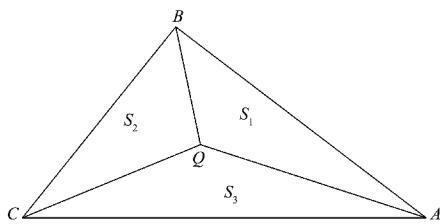


图 3 网格插值

## 1.2 AutoCAD 可视化二次开发

AutoCAD 是一款计算机辅助设计软件, 各行各业的绘图建模软件都与其有接口。Fortran 的灵敏计算和简易编程的能力突出, 但是缺乏视觉编程和互动界面。相比之下, C#作为一种面向对象的视觉编程语言, 拥有良好的互动性和弹性, 界面友好。因此, 本文基于 Fortran 和 C#的混合编程技术, 对 AutoCAD 进行二次开发。

### 1.2.1 流场可视化颜色

对于 AutoCAD, 可通过设置 R、G、B 数值利用 RGB 函数控制流场颜色显示。本文流场颜色采用渐变色显示, 颜色范围从蓝色 (RGB 值为 0, 0, 255) 至红色 (RGB 值为 255, 0, 0)。将流场流量标准化处理后, 线性化插值计算得到各数值对应颜色 RGB 数值从而实现流场渐变显示, 由如下代码实现:

$$dz=Z_{\max}-Z_{\min}$$

$$dzz=Z_{\max}-Z$$

$$h=dzz/dz$$

$$I=\text{int}(h^*4)$$

$$f=h^*4.0-I$$

$$q=1-f$$

$$K=\text{MOD}(I,4)$$

$$K=0; r=255; g=f^*255; b=0$$

$$K=1; r=q^*255; g=255; b=0$$

$$K=2; r=0; g=255; b=f^*255$$

$$K=3; r=0; g=q^*255; b=255$$

如  $Z_{\min}=0$ 、 $Z_{\max}=1$ 、 $Z=0.5$ ,  $Z$  的 RGB 为 (0, 255, 0), 对应绿色;  $Z=0.8$ ,  $Z$  的 RGB 为 (255, 203, 0), 对应黄色。从而实现数值与颜色的一一对应。

### 1.2.2 箭头流场绘制

箭头形式的流场可直观地识别水流的方向、速度变化以及可能存在的涡漩等特征。设流场数据为  $(X, Y, U, V)$ , 通过以下公式计算合流速  $U_m$ 、流向角  $\Psi$  和流速矢量终点坐标  $M(X_1, Y_1)$ :

$$U_m=\sqrt{u^2+v^2} \quad (4)$$

$$\psi=\arctan(v/u) \quad (5)$$

$$X_1=X+KU_m \cos \psi \quad (6)$$

$$Y_1=Y+KU_m \sin \psi \quad (7)$$

式中:  $U, V$  分别为流速矢量起点坐标  $X$  和  $Y$  方向的流速;  $K$  为矢量扩大倍数。

### 1.2.3 云图绘制

1) 生成点集。假设闭合多边形的点集表示为  $P(X_i, Y_i)$ , 其中  $i(1:N)$ 。通过计算多边形点集  $X$  和  $Y$  的最小值( $X_{\min}, Y_{\min}$ )和最大值( $X_{\max}, Y_{\max}$ ), 建立一个以  $(X_{\min}, Y_{\min})$  为左下角点、 $(X_{\max}, Y_{\max})$  为右上角点的矩形框。从起始点  $(X_{\min}, Y_{\min})$  开始, 沿着  $X$  方向以步长  $d_x$  增加, 沿着  $Y$  方向以步长  $d_y$  增加, 直到超过矩形框的边界, 生成了一个点集  $Q$ 。

为了确定点集  $Q$  是否位于给定多边形的内部, 并保留边界内的点, 采用射线法进行点与多边形的相对位置判断<sup>[10]</sup>。射线水平延伸自点  $Q$ , 并记录射线与多边形各边的交点数量  $n$ 。若  $n$  为奇数, 则点  $Q$  位于多边形内部, 并将其标记为  $Q_1$ ; 若  $n$  为偶数, 则点  $Q$  位于多边形外部, 并将其标记为  $Q_2$ 。

需要注意的是，当点  $Q$  恰好位于多边形的边界上时，需要考虑射线与该边的交点是否包括边的端点。此时，根据实际需求决定将其归类为内部点或外部点，见图 4。射线法具有高效性和准确性，在计算机图形学和地理信息领域得到了广泛应用。该方法通过水平射线与多边形各边的交点数量判断点与多边形的相对位置，为点集划分提供了一种有效的方案。

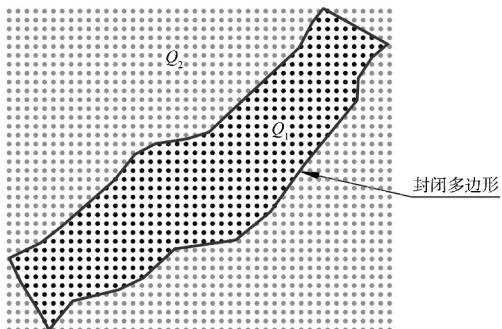


图 4 多边形内、外部点集判断

2) 点集  $Q_1$  三角网格生成并填充颜色。由于 Delaunay 三角生成的三角网是凸包，只需要封闭多边形内部即河道边界内的三角网进行计算。为了实现这一目的，采用三角形重心判断法，即对于每个三角形，通过射线法判断重心是否位于三角形内部，若在内部则保留，否则删除，以提高后续插值速度。插值方法与流场节点插值相同，再用 C# 中填充内部三角网<sup>[11]</sup>，并根据 3 个节点的平均值确定颜色。

#### 1.2.4 等值线绘制

在三角网内部，采用面积加权法进行插值计算以获得各个三角形内部的数据值。通过设定合适的数值范围和间隔，遍历三角网格中的每一个三角形，并判断等值线与边相交的位置是否在三角形内部，确定等值线经过的边界。利用插值计算得到的数值和设定的等值线数值范围，确定等值线与边界的交点以及其相对位置比例。通过编程使用 AutoCAD 中的多段线命令绘制平滑的等值线，将其绘制在三角形的边界上。

## 2 程序设计

1) 编译平台为 Visual studio 2012，打开 Microsoft Visual studio，选择 Fortran 下的 Library 模块，创建 Dynamic-Link Library 类型的工程，将上述各部分子程序插入到该工程中，编译成所需的动态链接库 .dll<sup>[12]</sup>。

### FORTRAN 编写动态库 .dll

```
subroutine jt(x,y,x1,y1,x2,y2,n1,um,minum,maxum,dx,dy,tx,
txy,txtx,jd1,beibi,zigao,jiange)
```

```
!DEC $ ATTRIBUTES DLLEXPORT :: JT
```

```
!DEC $ ATTRIBUTES STDCALL, ALIAS:: jt' :: JT
```

```
!dec $ attributes reference ::
```

```
x,y,x1,y1,x2,y2,n1,um,minum,maxum,dx,dy,tx,txy,
jd1,beibi,zigao,jiange
```

```
subroutineseduqu(tri_num,x1,y1,x2,y2,x3,y3,ze,n1,minze,
maxze,dx,dy)
```

```
!DEC $ ATTRIBUTES DLLEXPORT :: DUQU
```

```
!DEC $ ATTRIBUTES STDCALL, ALIAS:: 'duqu' :: DUQU
```

```
!dec $ attributes reference :: tri_num,x1,y1,x2,y2,x3,y3,
ze,minze,maxze,jiange,dx,dy
```

2) 在 C# 程序里创建类库，通过 DllImport 导入将要调用的 DLL 界面，完成 C# 对 Fortran 动态链接库的调用，最终实现 2 种语言的混合编程<sup>[13]</sup>。

### C# 调用 .dll

```
[DllImport(@ "D:\CAD 云图制作\云图 fortran-dll\yt-fortran-
dll\x64\Debug\for-dll.dll" )]
```

```
public static extern void duoduqu (ref int tri_num, ref double x1, ref
double y1, ref double x2, ref double y2, ref double x3, ref double y3,
ref double ze, ref double dx, ref double dy);
```

```
[DllImport(@ "D:\CAD 云图制作\云图 fortran-dll\yt-fortran-
dll\x64\Debug\for-dll.dll" )]
```

```
public static extern void duqu1 (ref Doubleminz, ref Double maxz,
ref Double jiange, ref double x1, ref double y1, ref double z1, ref
double x2, ref double y2, ref double z2, ref int n2);
```

```
[DllImport(@ "D:\CAD 云图制作\云图 fortran-dll\yt-fortran-
dll\x64\Debug\for-dll.dll" )]
```

```
public static extern void duqu3 (ref intn, ref double x, ref double y);
```

### 3 应用示例

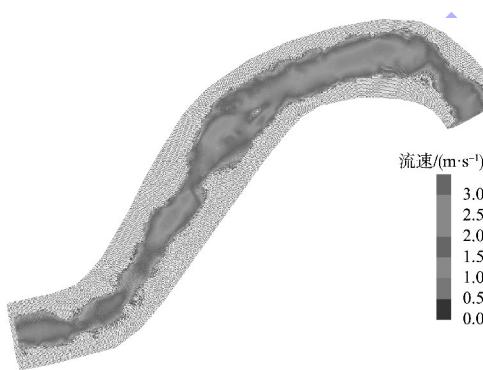
以三峡库区长寿区河段为例, 基于已经计算得出的流场 data.txt 文件绘制流场图。

#### 3.1 箭头形式的流场

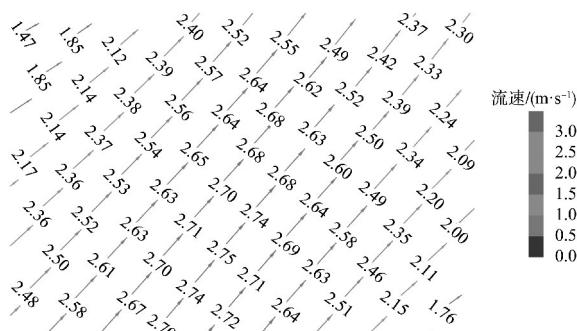
在 AutoCAD 命令栏中输入 NETLOAD 加载箭头流场绘制 .dll 程序, 再在命令栏输入 jt, 展现程序封面, 单击“查找流场文件并绘制”, 即 data.txt 文件, 箭头长度倍比为流场扩大的倍数, 最大流速、最小流速为图例的上限和下限, 可选择是否加文字、箭头是否上色, 根据需要自行设置, 见图 5。



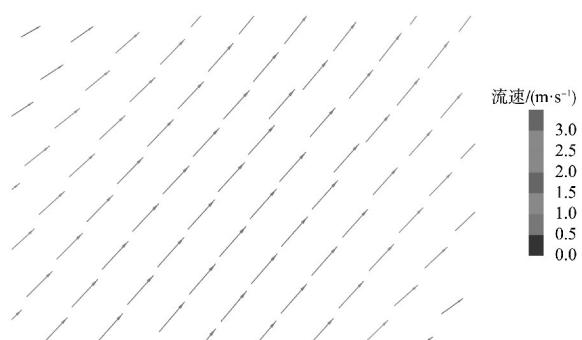
a) 流场矢量图 CAD 参数界面



b) 流场矢量整体效果



c) 流场矢量局部效果(文字+颜色)



d) 流场矢量局部效果(无文字+颜色)

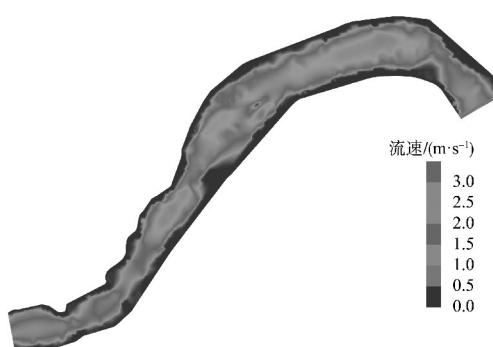
图 5 箭头形式的流场示例

#### 3.2 云图形式的流场

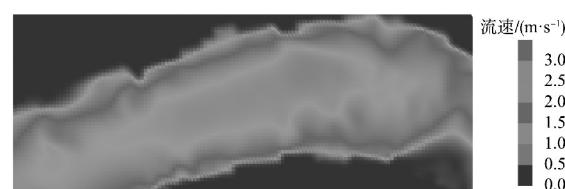
在 AutoCAD 命令栏中输入 NETLOAD 加载云图流场绘制 .dll 程序, 再在命令栏输入 yt, 展现程序封面, MIN、MAX 为图例的上限和下限, 可选择绘制流场云图、边界及等值线, 见图 6。



a) 流场云图 CAD 参数界面



b) 流场整体云图



c) 流场局部云图

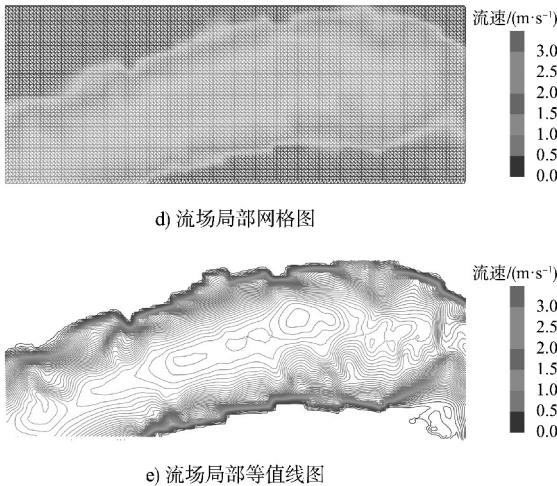


图 6 云图形式的流场示例

#### 4 结语

1) 本文以 AutoCAD 为基础, 充分应用 Fortran 语言计算精确和 C# 语言在跨平台支持以及可视化应用开发方面的独特优势, 自主研发了流场生成及可视化程序。

2) Delaunay 三角插值法能够提供准确、高效的插值结果; 用射线法进行 2 次操作, 一次在构建网格时进行边界点的判断, 一次在删除河道边界外部点时进行处理, 从而有效提升插值效率, 可为类似网格插值计算提供借鉴。

3) 由于 AutoCAD 无法承接过大的数据, 在网格精度过高时如何减少计算量需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 张细兵, 毛冰. 基于 Google Earth 的分蓄洪区水沙模拟与演示系统研究 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 8-11.
- [2] ZHANG S H, LI W D, LEI X H, et al. Implementation methods and applications of flow visualization in a watershed simulation platform [J]. Advances in engineering software, 2017, 112: 66-75.
- [3] 徐威杰. 基于 GIS 的海水三维可视化研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [4] 李忠伟, 徐斌, 李永, 等. 基于非结构化三角网格的海洋流场可视化 [J]. 图学学报, 2022, 43(3): 486-495.
- [5] 李文达, 张尚弘, 侯君, 等. 流场动态可视化平台关键技术与应用 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(1): 95-103.
- [6] ZHAO S L, JIN S, AI C F, et al. Visual analysis of three-dimensional flow field based on WebVR [J]. Journal of hydroinformatics, 2019, 21(5/6): 671-686.
- [7] 杨利容, 简兴祥. Delaunay 三角剖分插值算法在 MT 成图中的应用 [J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 14-17.
- [8] 余杰, 吕品, 郑昌文. Delaunay 三角网构建方法比较研究 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(8): 1158-1167.
- [9] 袁舒, 杨炬. 基于 Delaunay 三角网生长法的并行图像插值方法 [J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(3): 62-68.
- [10] 章磊, 何芬, 李鸿赞. 一种基于奇异射线法检测点在多边形内的方法 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S2): 133-135.
- [11] 赵宁, 黄地龙, 徐莉. 基于 C# 的区域自动填充 CAD 二次开发 [J]. 工程勘察, 2008(1): 58-61.
- [12] 李志鹏. 基于云计算与多语言的电磁算法动态嵌入系统设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [13] 李勤, 李庆春, 冯宏. C# 和 FORTRAN 混合编程在地震速度分析中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1503-1507.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 178 页)

#### 参考文献:

- [1] 张义军, 梅竞艳. 船舶大型化条件下的船闸管理对策 [J]. 中国水运 (上半月), 2015(7): 26-27.
- [2] 刘明维, 李明龙, 吴林键, 等. 船闸浮式系船柱受荷响应力学模型 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41(5): 127-132.
- [3] 刘明维, 王钟浩, 吴林键, 等. 船闸浮式系船柱系统安全监测方法研究 [J]. 水运工程, 2023(3): 85-91.
- [4] 张虎, 尹斌勇. 船闸新型浮式系船柱的设计与应用 [J].

人民长江, 2019, 50(9): 137-140.

- [5] 李超军, 叶雅思, 刘志敏. 内河船闸浮式系船柱高度及浮筒关键参数研究 [J]. 水运工程, 2024 (3): 96-100.
- [6] 李超军, 叶雅思, 李金朋. 基于 BIM 技术的船闸浮式系船柱结构设计 [J]. 水运工程, 2023(9): 171-176, 210.
- [7] 李超军, 叶雅思, 唐洁. BIM 技术在船闸金属结构全生命周期中的应用 [J]. 水运工程, 2019(3): 159-164.

(本文编辑 赵娟)