



# 基于 Delaunay 三角网的大规模 航道地形构建及疏密控制\*

高菲, 任鸿翔, 闫霞

(大连海事大学, 航海动态仿真和控制实验室, 辽宁大连 116026)

**摘要:** 针对大规模航道地形绘制效率低等问题, 通过离散航道水深数据构建地形三角网格, 借鉴 LOD 思想对网格进行疏密控制与显示。采用一种基于 Delaunay 三角网的方法构建航道地形, 利用 alpha-shapes 边界提取方法对 Delaunay 三角网进行优化; 提出利用网格划分法控制网格的疏密, 通过比较克里金插值模型的拟合效果选择适合的变异模型, 解决水深点采样不足、场景绘制效率低等问题。应用结果表明, 上述方法可用于大规模航道地形的实时绘制。

**关键词:** Delaunay 三角网; 克里金插值; 航道地形; 网格加密; 网格稀疏; alpha-shapes

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0215-06

## Channel terrain generation and density control based on Delaunay triangulation

GAO Fei, REN Hong-xiang, YAN Xia

(Marine Dynamic Simulation and Control Laboratory, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Considering the low efficiency of large-scale channel terrain rendering, this paper constructs the triangular terrain grid through discrete water depth data of channels and uses the idea of LOD to control and display the density of grids. Specifically, the method based on the Delaunay triangulation is used to construct the channel terrain, and the alpha-shapes boundary extraction method is employed to optimize the Delaunay triangulation. A grid division method is proposed to control the density of grids. Moreover, a suitable variation model is selected through the comparison of the fitting effects by the Kriging interpolation model to solve the problems of insufficient sampling of water depth points and low efficiency of scene rendering. The application results indicate that the method can be used for real-time rendering of large-scale channel terrain.

**Keywords:** Delaunay triangulation; Kriging interpolation; channel topography; grid refinement; grid sparseness; alpha-shapes

现有的电子航道图是一种符合标准的二维矢量数据, 只能以二维的形式进行展示和应用。近年来, 三维 GIS 技术、VR 技术的快速发展为电子航道图应用提供了新的发展方向和技术手段。研究三维航道地形的生成方法、快速绘制海底地形场景可为三维电子航道图、航道监管决策和船舶交通管理等提供立体化支撑。

海洋、江河的地形数据获取较难, 通常只能获取部分的离散水深数据<sup>[1]</sup>。针对数据点不足的情况, 学者一般采用插值算法构建地形模型。如施朝健<sup>[2]</sup>提出应用 Levenberg-Marquardt 反向学习网络对离散的水深数据点进行插值。肖丁<sup>[3]</sup>比较了克里金法、样条插值法等生成三维海底地形的准确性。申静等<sup>[4]</sup>基于克里金算法中的球形模型研

收稿日期: 2022-03-29

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52071312, 51939001); 辽宁省自然科学基金航运联合基金项目(2020-HYLH-29); 大连市科技创新基金项目(2021JJ12GX031)

作者简介: 高菲(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为虚拟现实、航海仿真。

究水深点插值问题。

克里金空间插值在海底地形插值方面有一定的优势，但目前并没有针对海底地形研究克里金算法中不同变异模型的差异。此外，学者对于航道地形更多关注的是水深点数据较少而导致的精度不足问题。另一方面，随着航道范围的增大，大规模地形的绘制效率会快速下降<sup>[5]</sup>。如何在保证地形精度的前提下，有效减少多边形面片数量、提升绘制效率将成为航道地形研究的重点。

基于上述研究的不足，本文在利用区域生长法边界约束生成航道地形的基础上，采用网格划分法控制生成网格的疏密，解决采样点不足、场景绘制效率低等问题。比较克里金插值不同变异模型间插值水深点与原水深数据点的拟合度，使插值模型更好地反映海底地形特征。

### 1 航道地形建模及疏密控制方法

#### 1.1 航道地形建模及边界优化

针对航道水深数据分布不均的特点，采用区域生长法构建 Delaunay 三角网，采用区域生长法构网后，会生成一些非必要狭长三角形和少量非最近相邻点构成的三角形，导致无法准确显示航道地形，如图 1a) 中方框所示。为此，使用 alpha-shapes 算法对其进行优化。

alpha-shapes 通过在无序点集构建凸包的基础上扩展可设定参数  $\alpha$ <sup>[6]</sup>，去除不必要的线条，从而提高构网质量。利用已构建好的三角网求取生成所有三角形的平均边长，然后根据每个三角形的边长是否大于  $\alpha$  倍的平均边长，将不必要的边剔除。

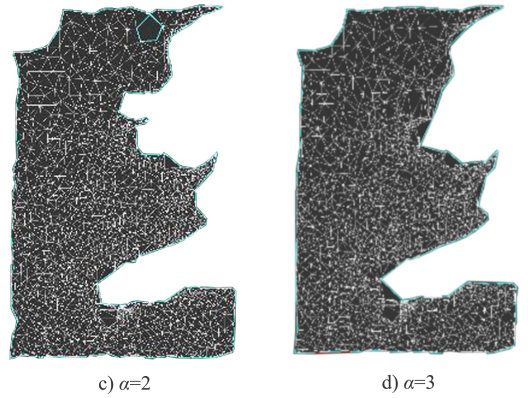
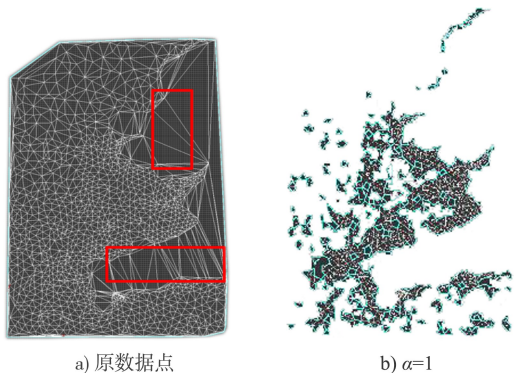


图 1 不同  $\alpha$  值提取边界

由图 1b) ~ d) 可以看出， $\alpha$  过小或过大时均不能准确提取航道轮廓线，当  $\alpha=2$  时可以准确显示航道地形。

#### 1.2 克里金插值

克里金插值算法根据区域变化量存在空间相关性和不同变异函数的结构特点，对未知点区域变化量的取值进行最优化估计，使估值线性无偏<sup>[7]</sup>。

设  $z(x)$  是点  $x$  的区域化变量，且满足二阶平稳(或本征假设)。  $z(x_i) [i=1, 2, \dots, n]$  是一组离散的信息数据，它们定义在点  $x$  上，即  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，那么克里金插值法的公式为<sup>[8]</sup>：

$$z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

式中： $z^*(x)$  为区域化变量  $z(x)$  的无偏最优估计值； $\lambda_i$  为权重系数，表示各空间样本点  $x_i$  处的观测值  $z(x_i)$  对估计值  $z^*(x)$  的贡献度。

为了对区域化变量的未知值做出估计，需要将实验变异函数拟合成相应的理论变异函数模型<sup>[9]</sup>，这些模型直接参与到克里金插值算法中。克里金常用的理论变异模型很多，要针对不同情况选择合适的变异函数理论模型。设  $C_0$  为块金常数， $C$  为拱高， $h$  为 2 个样本点空间相隔距离，选择以下模型进行研究。

1) 球面模型，公式为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h=0) \\ C_0 + C \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right) & (0 < h \leq a) \\ C_0 + C & (h \geq a) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $C_0 + C$  为基台值； $a$  为变程。

2) 线性模型, 公式为:

$$\gamma(h) = C_0 + Ch \quad (3)$$

3) 幂函数模型, 公式为:

$$\gamma(h) = h^\theta \quad (0 < \theta < 2) \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为幂指数。

4) 高斯模型, 公式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right) \quad (5)$$

其中高斯模型的变程为  $\sqrt{3}a$ 。

### 1.3 网格划分法

#### 1.3.1 网格加密

为增加构网密度和更准确地表示地形特征, 首先, 计算出航道所在区域经纬度的最大值与最小值, 并均分计算, 构成经纬度  $N \times N$  个网格。利用射线法<sup>[10]</sup>判断点是否在航道区域内, 在区域内部则保留该点, 在区域外部则进行剔除。对航道区域内的点利用克里金插值求得每点经纬度对应的水深值。

#### 1.3.2 网格稀疏

采用网格划分法对加密后的数据进行稀疏处理并确保处理后的数据分布符合原数据区域分布。

首先, 获取数据点经纬度的最值, 按照需要的网格疏密程度选取网格数量 ( $K \times K, K \in N^+$ ), 通过网格数量求取每个网格的间距。如图 2 所示, 采用原数据个数作为网格数量, 遍历所有数据点, 将其存入每一个网格列表中。遍历每一个网格列表, 求出每个网格中离网格中心点最近的点并将其保留, 其余点剔除。

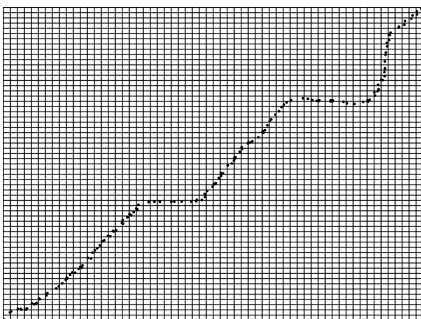


图 2 网格稀疏

### 1.4 总体技术路线

基于区域生长法构建航道地形, 针对非必要狭

长三角形和少量非最近相邻点构成的三角形导致无法准确显示航道地形的问題, 使用 alpha-shapes 算法进行边界优化, 保证生成三角网的质量。针对构网加密的问题, 采用求经纬度最值划分均匀网格的方法, 通过比较克里金算法不同变异模型间插值得到的水深点与原数据点的拟合度, 寻求最优变异函数模型。根据网格稀疏方法使数据点变稀疏且仍符合原数据分布特征。总体技术路线见图 3。

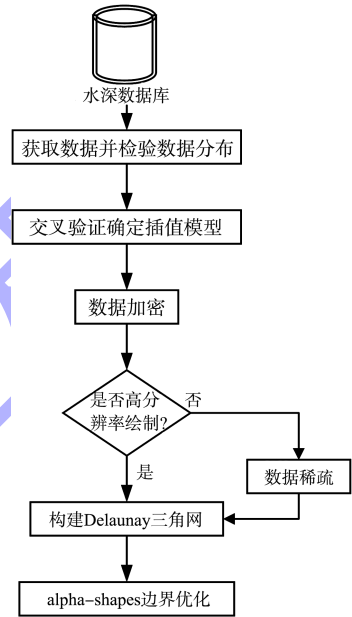


图 3 技术路线

## 2 数据检验及变异函数模型对比验证

### 2.1 数据检验

以衢江实测水深数据(表 1)为基础进行克里金插值, 克里金算法应用的前提是数据服从正态分布, 因此, 首先对数据进行直方图检验。

表 1 衢江实测水深部分数据

x/km	y/km	水深/m
9.433	13.287	-21.5
9.438	13.243	-21.5
9.428	13.333	-21.7
9.367	13.427	-18.7
9.338	13.421	-19.4

注:  $x$ 、 $y$  为测点在自定义坐标系中的坐标值。

图 4 为水深模型分布直方图, 统计量峰度值接近于 3, 偏度值接近于 0, 中值与均值相近, 直方柱状图和数据大体呈对称分布, 符合克里金插值要求。

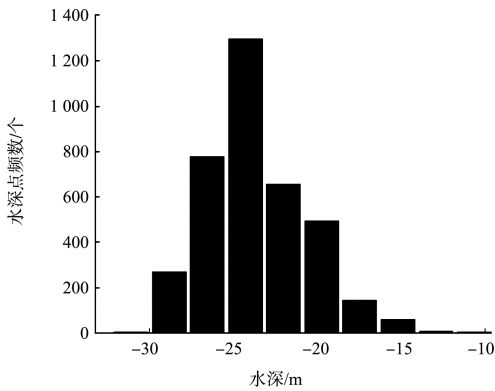
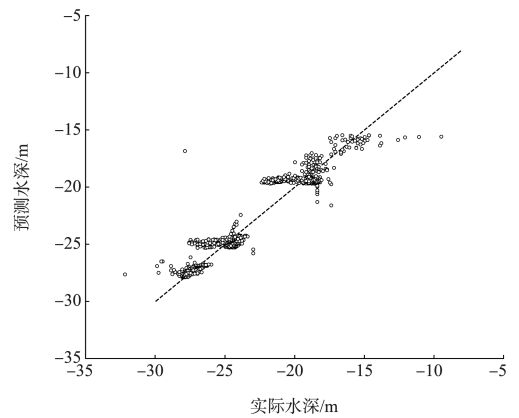


图4 水深模型分布直方图

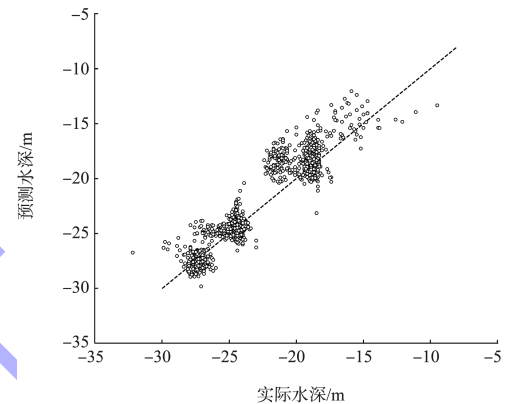
### 2.2 不同变异模型对比

不同海底地形起伏特征不完全相同,使用克里金方法不同的变异函数模型插值结果并不具有普适性,需依据实际地形选择。

采用留一交叉验证的方式对比不同变异函数数理模型的拟合效果。水深数据点为  $N$  个,将  $N-1$  个水深点用作基准数据,剩余 1 个水深数据点用作验证数据。依次重复拟合验证数据的水深,直到每个水深点都已用作验证数据。球面、线性、幂函数和高斯模型的拟合效果见图 5。

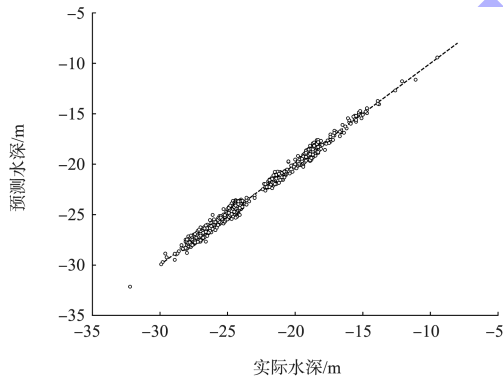


c) 幂函数模型

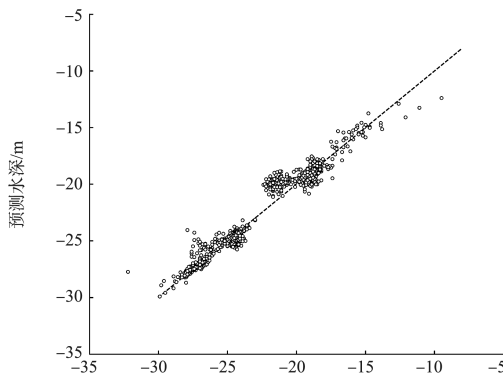


d) 高斯模型

图5 不同变异函数模型拟合效果



a) 球形模型



b) 线性模型

### 2.3 误差分析

选用衡量变量精度的 2 个常用指标对 4 种变异模型进行误差分析,分别是平均绝对误差 MAE 和均方根误差 RMSD。其中  $y_i$  代表实际水深数据点值,  $x_i$  代表预测水深点值,  $n$  代表水深点个数。平均绝对误差的表达式为:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (6)$$

均方根误差是预测值和实际观测值偏差的平方与观测次数  $n$  比值的平方根,其表达式为:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (7)$$

不同模型检验结果见表 2。

表 2 不同模型检验结果

模型	RMSD	MAE
球面	0.30	0.24
线性	0.68	0.47
幂函数	0.98	0.65
高斯	3.68	2.92



由表 2 可知, 球形模型在 RMSD 和 MAE 2 个方面明显优于其他 3 个模型。线性模型次之, 高斯模型效果最差。

由此可知, 在研究区域内, 选用球状模型拟合效果较好。

### 3 案例分析

#### 3.1 项目概况

浙江金华辖区衢江航道设计水深为 3.4 m, 全线可通航 500 吨级船舶, 按天然及渠化河流 IV 级航道标准改造。衢江河床宽约 300~900 m, 航道较为弯曲, 一般弯曲半径大于 500 m, 最小处为 150 m。该水域航道深槽底高程为 18~22 m, 设计最高通航水位 27.58~27.87 m, 最低通航水位 22.50 m。在最低通航水位 22.52 m 条件下, 水深 2.70~3.52 m, 水下地形复杂, 航道水位见表 3。

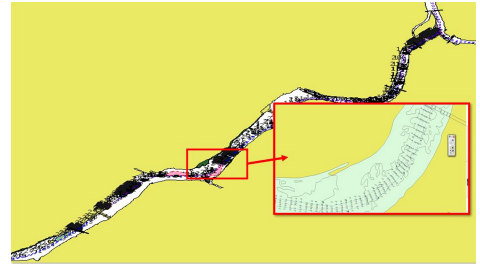
表 3 航道设计水位

断面	最高水位/m	最低水位/m	断面	最高水位/m	最低水位/m
姚家船闸终点	28.3	22.8	黄溢大桥	27.5	22.5
衢江大桥	28.1	22.6	下埠头	25.5	22.4
横山大桥	27.9	22.5	麻车大桥	24.7	22.4
三江口	27.8	22.5	大洋弯道	24.4	22.4
兰溪人行浮桥	27.6	22.5	梅陈活性炭厂	23.9	22.4

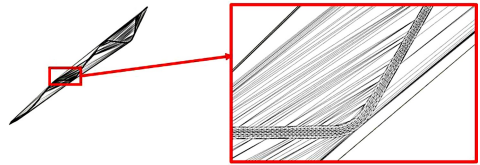
#### 3.2 三维航道地形构网及疏密控制

##### 3.2.1 地形构网

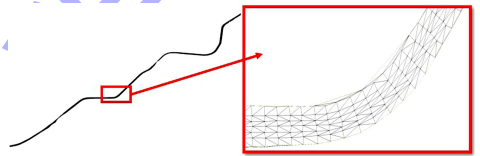
部分原始二维电子航道见图 6a), 以 Visual Studio 2019 为开发平台, 采用区域生长法构筑衢江航道三角网格, 借鉴细节层次思想 (Levels of Detail, LOD)<sup>[11]</sup> 对网格密度加以控制, 提高所构海底地形的精度以及绘制效率。从图 6b) 中可以看出, 航道网格存在一些错误连接或非必要的三角形(方框区域), 因此采用 alpha-shapes 算法进行边界优化, 将参数  $\alpha$  设置为 2, 优化后的效果如图 6c) 所示。原始水深数据点生成的航道地形线和三维航道场景见图 7。



a) 部分原始二维航道

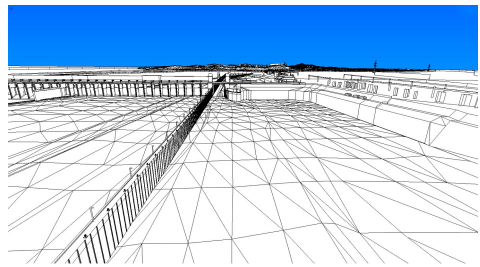


b) 错误连接

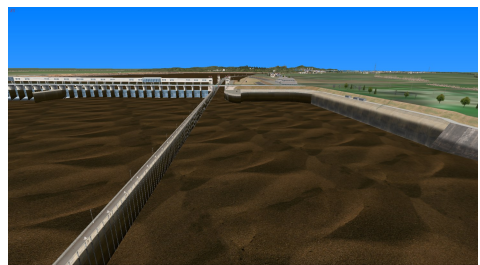


c) 优化后构网

图 6 部分原始二维航道和优化后构网



a) 航道地形线



b) 航道地形场景

图 7 原始数据点航道地形线和场景

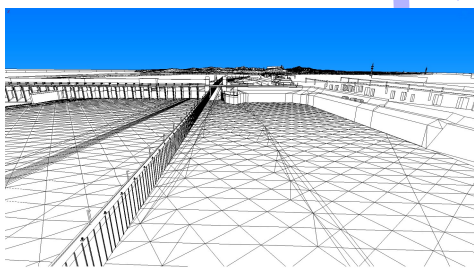
##### 3.2.2 疏密控制

针对采集数据不足的问题, 为提高构建地形的精度, 采用 1.3.1 的网格加密方法进行加密。研究区域东西狭长、南北距离短, 经纬度差值小,

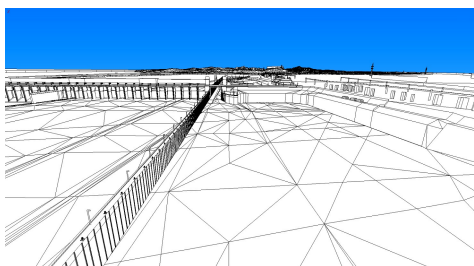
对其进行均分计算。采集衢江航道水深点的数量划分成  $10\ 000 \times 10\ 000$  个网格, 使用射线法判断加密点是否在研究区域内, 不在区域内的剔除。对航道区域内的点利用克里金插值求得每点经纬度对应的水深值, 图 8a) 是加密后生成的航道地形的线框图。

网格稀疏的主要目的是保证大规模航道地形的绘制效率, 借鉴 LOD 思想, 将航道地形划分为若干个区域, 对每个区域生成疏密程度不同的多个模型。当该区域与观察视点较近时, 调用详细模型显示; 当该区域与观察视点较远时, 调用简化模型显示。在不影响场景真实感的前提下, 通过减少场景中多边形的数量提高场景的绘制效率。

为了生成多个疏密程度不同的模型, 在通过网格加密生成复杂模型基础上, 首先获取经纬度最值(同加密步骤), 按照网格的疏密程度选取网格数量  $K$ , 采用原数据点个数作为网格数量。采用 1.3.2 的网格稀疏方法对网格稀疏化, 且稀疏化的数据仍符合原数据的区域范围, 简化构网后见图 8b)。



a) 加密后



b) 简化构网后

图 8 航道地形线

水深点数据不足的问题; 另一方面, 网格变疏可以生成简化的模型, 针对距离视点远的显示稀疏的网格, 距离视点近的显示加密网格, 可以有效减少系统对硬件资源的消耗, 提高系统的绘制效率。

2) 通过对克里金插值方法不同模型之间的拟合程度比较, 得出球面模型是最适用于研究区域的水深插值点模型。

3) 克里金插值算法能真实反映航道水深地形的空间变化, 但相对于其他的插值算法, 计算较复杂, 会影响插值的速度。今后需着重优化克里金算法插值速度问题, 提高插值效率。

#### 参考文献:

- [1] 孙晓路, 张立华, 贾帅东, 等. 利用地貌形态相似性评估外版海图水深质量[J]. 海洋测绘, 2019, 39(3): 20-25.
- [2] 施朝健. 基于神经网络的水深插值研究[J]. 中国航海, 2003(4): 8-12.
- [3] 肖丁. 基于电子海图的几种三维海底地形算法比较[J]. 中国水运(下半月), 2014(4): 87-90.
- [4] 申静, 苏天赟, 王国宇, 等. 基于 Kriging 算法的海底地形插值设计与实现[J]. 海洋科学, 2012, 36(5): 24-28.
- [5] 闫爽, 郭兰博, 王严, 等. 基于 LOD 技术的虚拟场景建模方法的研究与应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(9): 145-147.
- [6] 王天宇, 惠怡安, 芮盼盼, 等. 基于 Alpha Shape 算法的分散式乡村聚落形状划分及其形成研究: 以米脂县龙镇为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 946-954.
- [7] 房鹏, 陈丽钧. 三维空间属性体克里金插值方法的研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(1): 231-232.
- [8] 李森, 安智明. Kriging 模型在区域重力数据插值中的应用[J]. 测绘通报, 2013(10): 63-66, 128.
- [9] 鲜乾坤, 万宁, 贺全兵, 等. 基于 Kriging 插值的 3D 地形可视化[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2009, 22(6): 47-49, 53.
- [10] 曾华鹏, 刘通, 周曦国, 等. 基于改进射线法和决策树的压缩机排气温度控制系统[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 75-80.
- [11] 丁田妹, 徐发达. 三维模型中多层次细节 LOD 技术研究[J]. 电子制作, 2021(18): 35-37.

## 4 结论

1) 在生成三维航道地形的基础上, 对生成的网格进行疏密控制。一方面, 网格加密可以解决