

# 基于数字高程模型的输电线路虚拟地形绘制优化算法

黄淮<sup>1</sup> 陈攀<sup>2</sup> 潘圆君<sup>3</sup> 戴宇辰<sup>1</sup> 黄育宁<sup>1</sup>

(1. 南京工程学院 电力学院 南京 211167; 2. 杭州市电力设计院有限公司 杭州 310009;

3. 国网浙江杭州市萧山区供电公司 杭州 311201)

**摘要:** 针对现有输电线路仿真培训系统复杂地形和大规模场景的建模问题,研究了基于数字高程模型(DEM)的虚拟地形绘制优化算法。通过采集输电线路走廊位置和范围内的地形高程数据,结合分治算法和流水线技术实现Delaunay三角网的并行构建。并针对高斯曲面方程拟合三角形表面中的参数问题,提出了基于遗传算法的最优参数选择方法,降低了地形表面的整体误差。在Qt平台上实现了输电线路真实场景的三维可视化重构。仿真结果表明,本算法有效实现了输电线路真实地形的虚拟可视化,提高了虚拟场景的还原度和沉浸感。

**关键词:** 数字高程模型;地形绘制;Delaunay三角网;遗传算法

**中图分类号:** TP391.9;TN949.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.60

## Optimization algorithm of virtual terrain rendering for transmission lines based on DEM

Huang Huai<sup>1</sup> Chen Pan<sup>2</sup> Pan Yuanjun<sup>3</sup> Dai Yuchen<sup>1</sup> Huang Xiaoning<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Hangzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310009, China;

3. State Grid Zhejiang Hangzhou Xiaoshan Power Supply Company, Hangzhou 311201, China)

**Abstract:** Aiming at the modeling of complex terrain and large scale scene of transmission line, this paper discusses the virtual terrain rendering optimization algorithm. On the basis of collecting the terrain elevation data in the location and range of the transmission line, Delaunay triangulation is generated by divide-conquer algorithm and pipeline technology. Moreover, a method of optimal parameter selection based on genetic algorithm is introduced to solve the problem of triangular surface with Gauss's surface equation. And the three-dimensional visualization of transmission line is achieved on the platform of Qt and OpenGL. Simulation result shows that this algorithm is effective for the virtual visualization of the real terrain of transmission lines.

**Keywords:** digital elevation model; terrain rendering; Delaunay triangulation; genetic algorithm

## 1 引言

随着计算机图形学和三维引擎的发展,虚拟仿真技术已经广泛应用于电力系统培训中。通过构建空间沉浸、实时交互的可视化平台,在计算机营造的虚拟环境中进行操作和练习,为培训教学提供了具体的对象和高效的手段,有利于提高学员的理论知识、安全意识和技能水平<sup>[1-2]</sup>。

由于输电线路距离长,沿途跨越的地形结构复杂多变,如何有效简化几何模型,构建复杂地形和大规模场景三维模型成为输电线路仿真的主要瓶颈<sup>[3]</sup>。文献[4]运用OpenGL通用图形程序搭建了输电线路本体和周围环境的虚拟场景,只能满足视觉信息展示,缺乏真实的地理信息数据,

严重降低了虚拟场景的还原度和沉浸感;文献[5]研究了基于激光扫描获取地形数据的输电线路走廊三维模型搭建方法,然而庞大的地形数据严重影响了虚拟场景的建模速度。

数字高程模型(DEM)通过空间数字坐标实现了对区域表面地形地貌的模拟,是地理信息系统(GIS)数据库的重要内容<sup>[6]</sup>。文献[7]介绍了数字高程模型中三维地形的数字表达形式,以卫星照片作为地形纹理映射的基础,设计并完成了相关数据格式转换算法;文献[8]进一步提出利用数字高程模型的高度地形图,结合四叉树等关键技术,实现了大规模地形建模和渲染。基于以上分析和前期的研究工作基础,本文以数字高程模型的空间数字化重现优势为基础,将真实的空间地理信息数据通过虚拟仿真技术进行三

维可视化,从而提高输电线路场景的还原度和沉浸感。

## 2 地形数据结构

地理坐标数据是构成数字高程模型的基础,其坐标表达式为:

$$V_i = (x_i, y_i, z_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $x_i$ ,  $y_i$  为高程数据点的平面坐标,  $z_i$  为该点对应的高程。

由于输电线路需要跨越复杂多变的地形走廊和自然环境,不仅高程模型数据量庞大,其空间分布也会不均匀,严重影响了虚拟场景的建模速度和效率。为满足三维模型的建模精度和速度要求,本文根据输电线路走廊的位置和范围进行虚拟场景地形数据的处理,获取高程模型数据的离散点三维坐标和拓扑网络结构信息,对复杂地形沿着等高线采样,对平坦地形保持等间距采点,保证地形数据的完整性。

## 3 不规则三角网(TIN)的构建

TIN 是通过连接空间中各数据点生成的连续三角形网格,用来表示虚拟场景的地形结构<sup>[9]</sup>。在构造过程中,由于 Delaunay 三角网具有内角最大化和外接圆无数据点的特点,生成最多的锐角三角形,得到了广泛的应用<sup>[10]</sup>。本文采用分治算法,通过 GPU 的流水线技术划分任务进程,改进了 Delaunay 三角网的构建算法,基本步骤如下。

1) 以  $x$  轴坐标为主,  $y$  轴坐标为辅,按升序对所有离散点进行排序。

2) 根据  $x$  轴坐标确定点集分割线,划分成左右两个数量近似相等的点集  $V_l$  和  $V_r$ ,如图 1 所示。

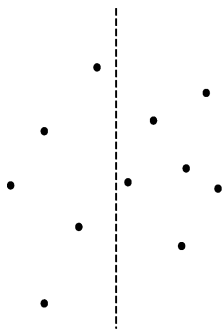


图 1 点集分割

3) 以两个点集的底线为基边,选取点集的最低点为基点与基边构建三角形,校验外接圆内是否存在其余数据点,如图 2 所示。若是,则重新选择基点构建三角形。

4) 以步骤 3) 的三角形两条边为基边,向分割线两侧寻找拓扑网中的数据点构建 Delaunay 三角网。

5) 运用局部优化算法 LOP 校验生成的三角网,检查第 4 个顶点是否在外接圆内,如果在,交换多边形对角线。

6) 重复步骤 4)~5),采用流水线技术处理三角形构

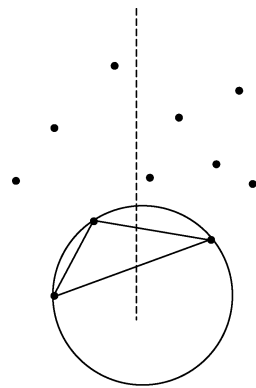


图 2 外接圆校验

建、外接圆检查和局部优化算法 LOP 模块,完成 Delaunay 三角网构建,如图 3 所示。

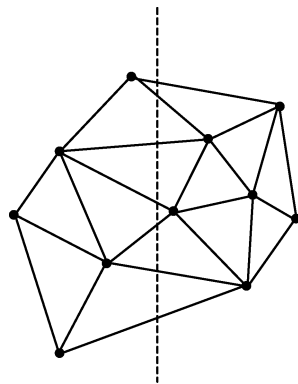


图 3 Delaunay 三角网

## 4 基于遗传算法的最优参数选择方法

以 TIN 中各三角形的顶点为固定点,采用高斯曲面方程模拟三角形表面,从而建立虚拟地形模型,并提出一种基于遗传算法的高斯曲面最优参数选择方法,提高模型的连续性和精度。

### 4.1 高斯曲面

由于输电线路通道周围的地形环境复杂多变,因此数学曲面的选择直接影响 DEM 模型的精度。高斯曲面能有效表示地势的平坦和起伏特征,同时各参数值的选择决定了曲面方程的地形模拟精度,其表达式为:

$$z = a \left[ 1 - \frac{x}{m} \right]^2 e^{-(x/m)^2 - (y/n+1)^2} - b \left[ 0.2 \frac{x}{m} - \left( \frac{x}{m} \right)^3 - \left( \frac{y}{n} \right)^5 \right] e^{-(\frac{x}{m})^2 - (\frac{y}{n})^2} - c e^{-(1+x/m)^2 - (y/n)^2} \quad (2)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为地形起伏参数,  $m$ 、 $n$  为区域范围控制参数。

### 4.2 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)通过模拟生物进化过程的自然选择和遗传机理进行迭代演化,从而搜索目标

函数最优解<sup>[11-12]</sup>。其遗传物质染色体由多个基因组合而成,依据迭代条件进行自动优化,基本过程如图 4 所示<sup>[13]</sup>。

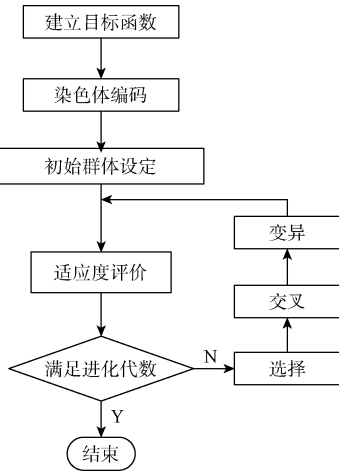


图 4 遗传算法流程

1) 建立目标函数:

$$f(z) = \min |z - z'| = \min$$

$$\left| \begin{aligned} & z - a \left[ 1 - \frac{x}{m} \right]^2 e^{-(x/m)^2 - (y/n-1)^2} + \\ & b \left[ 0.2 \frac{x}{m} - \left( \frac{x}{m} \right)^3 - \left( \frac{y}{n} \right)^5 \right] e^{-(x/m)^2 - (y/n)^2} + \\ & ce^{-(1+x/m)^2 - (y/n)^2} \end{aligned} \right| \quad (3)$$

2) 选择二进制的染色体编码方式,将 TIN 中三角形的顶点转换为遗传物质染色体中的基因,表达式为:

$$x = m + (n - m) \frac{\sum_{i=1}^e k_i 2^{e-i}}{2^e - 1} \quad (4)$$

式中: $m$ 、 $n$  为目标区域范围值, $k_i$  为染色体中第  $i$  位基因值, $e$  为染色体的长度值。

3) 初始群体确定。估算目标函数最优解的分布范围,并在此范围内随机选择初值进行遗传算法的迭代过程。

4) 引入单值、非负、连续的适应度函数,以此为依据评价染色体的适配值,适配值越大则越接近目标函数的最优解,函数表达式为:

$$F(z) = \frac{1}{f(z)} \quad (5)$$

5) 遗传操作,分为染色体的选择、交叉和变异。通过保留适配度高的染色体,交叉或者变异其中的部分遗传基因,从而产生新的染色体,逐步提高适配值。

6) 设置迭代次数终止条件以避免遗传算法过早收敛,得出目标函数的最优解。

## 5 仿真实例与分析

本算法以浙江某地区输电线路走廊场景为试验对象,基于 Qt 开发平台,硬件配置 CPU: Intel 酷睿 i5 3570; 内存

8 G; 显卡 AMD Radeon R7 M270。

根据采样要求获取该地区 10 000 个离散高程数据点,构造生成 TIN 模型,如图 5 所示。通过遗传算法优化高斯曲面方程中各参数,拟合各三角形表面的地形结构,构建输电线路走廊地形的虚拟场景,如图 6 所示。

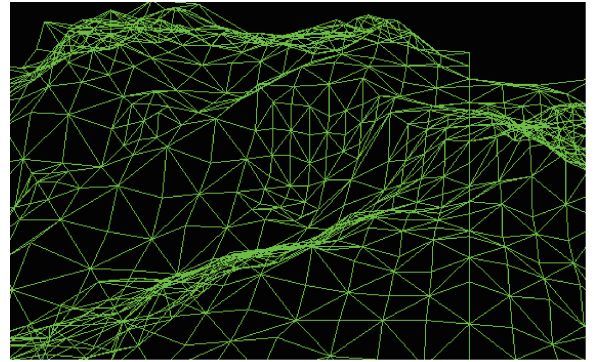


图 5 局部地形 TIN 模型



图 6 输电线路虚拟场景

同时,为验证本算法的模拟精度,选取了 100 个拟合点,将文献[14]中所述的解耦法、文献[15]中的最小二乘法和本算法作比较,结果如图 7 所示。结果表明,基于遗传算法的最优参数选择方法具有较高的模拟精度。

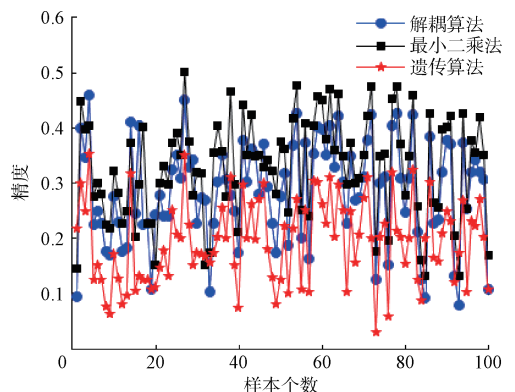


图 7 3 种方法误差统计

## 6 结 论

基于DEM的输电线路虚拟地形绘制算法通过采集和划分DEM数据构建了不规则三角网,重点研究基于遗传算法的地形高斯曲面最优参数选择方法,实现了输电线路真实地形场景的三维可视化重构,解决了系统在仿真复杂地形环境和大规模场景时的不足。同时,本算法也可以进一步拓展到其他领域虚拟仿真系统的室外大规模地形场景搭建中,提高场景的真实度和沉浸感。

## 参考文献

- [1] 陈海波,郑健,费瑞轶,等.虚拟现实技术在电力系统中的典型应用[J].电网与清洁能源,2016,32(2):20-25.
- [2] 杨中亚,赵勇,刘娟鹏,等.基于虚拟现实的输电线路巡视仿真培训系统设计与实现[J].电子测量技术,2015,38(4):92-97.
- [3] 闫泽豪,葛俊锋,叶林,等.基于模拟导线的输电线路覆冰探测系统[J].国外电子测量技术,2016,35(6):63-66.
- [4] 王国胜,张声圳,高广德,等.基于虚拟现实技术的输电线路巡视仿真培训系统[J].三峡大学学报(自然科学版),2013,35(4):66-69.
- [5] 麦晓明,陈驰,彭向阳,等.输电线路走廊三维可视化技术和系统设计[J].中国电力,2015,48(02):98-103.
- [6] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(09):1305-1325.
- [7] 姚旭寅.基于真实地形的无人机视景仿真系统设计与实现[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [8] 闫丰亭.大规模三维地形建模与渲染的研究及改进[D].济南:山东科技大学,2011.
- [9] 黄争舸,陈建军,郑耀.基于不规则三角网的分块地形网格生成算法[J].浙江大学学报:工学版,2009,43(10):1939-1944.
- [10] 谭云兰,李光耀,夏洁武,等. Delaunay三角网高效构建及地形仿真应用[J].计算机工程,2012,38(22):287-290.
- [11] 鱼佳欣,周春来,刘东平.改进遗传算法的无人机航路规划与仿真[J].计算机仿真,2013,30(12):17-20.
- [12] CHEN G Y, DU L B, HE H J, et al. Research on key techniques of expendable conductivity temperature depth measuring system [J]. Instrumentation, 2015(2): 18-27.
- [13] 阚哲,孟国营,王晓蕾,等.基于遗传算法的炉膛温度场重建算法研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(10):1149-1154.
- [14] 谭衢霖,徐潇,王浩宇,等.不同地貌类型区DEM空间内插算法精度评价[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(1):139-149.
- [15] 熊文卓,孙明超.采用最小二乘法提高变焦镜头的焦距值输出精度[J].仪器仪表学报,2014,35(S1):151-154.

## 作者简介

黄淮,1990年出生,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制、三维虚拟仿真技术。

E-mail:1158775541@qq.com