

# 一种基于点云数据的复杂地形 CFD 网格生成方法

刘新新<sup>1</sup>, 甘勇<sup>1,2</sup>, 郑远攀<sup>1,2</sup>

(1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 应急平台信息技术河南省工程实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对 CFD 网格生成中地形数据精确度不高的问题,提出一种基于点云数据的复杂地形 CFD 网格生成方法.该方法引入七参数求解方法生成地方坐标点云文件,采用点—线—面—体方式生成地形网格,并基于多面体网格转换方法进行网格优化.实例验证结果表明,生成的地形网格与实际地形吻合度高、数据精确度高,适合用于后期的 CFD 精细模拟应用.

**关键词:**网格生成;七参数;复杂地形;多面体网格转换

**中图分类号:**TP399 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.06.020

## A method for grids formation based on point cloud data complex terrain CFD

LIU Xin-xin<sup>1</sup>, GAN Yong<sup>1,2</sup>, ZHENG Yuan-pan<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Engineering Laboratory of He'nan Province for Emergency Management Platform

Oriented Information Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that terrain data accuracy is not high in CFD grid generation, a grid generation method based on point cloud data complex terrain CFD was put forward. This method generates the local coordinates of the point cloud file through the introduction of a seven-parameter solution method, and by the point - line - face - volume method for mesh generation, further polyhedral mesh conversion, the terrain mesh is optimized. The example validation showed that the application of method can generate high accuracy data and consistent with the actual terrain mesh, is suitable for the later stage of the fine CFD simulation applications.

**Key words:** mesh generation; seven-parameter; complex terrain; polyhedron mesh conversion

## 0 引言

近年来,由于石油泄漏、有害气体扩散等污染而导致的事故所造成的经济损失在国内外呈现逐年上升的态势.计算流体力学 CFD (computational

fluid dynamics)应用于气体泄漏扩散过程的数值模拟,将对进一步科学预防事故性泄漏的发生、指导紧急救灾具有重要理论价值和实践意义.复杂地形网格生成作为 CFD 模拟的前处理过程,是 CFD 软件进行数值离散模拟的前置条件,由此也就成为环

收稿日期:2012-09-25

基金项目:河南省科技攻关计划项目(102102310030);郑州轻工业学院博士基金项目(2010BSJJ006);郑州市科技创新团队计划项目(112PCXTD344)

作者简介:刘新新(1987—),女,河南省济源市人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为计算机图形学.

境能源发展中解决能源利用以及有效处理包括自然因素(复杂地形地貌、气象活动等)和人为因素(工业过程中为谋求社会福利而进行的活动等)在内所引起危害社会财产及人身安全的突发事件的一项重要课题。

国内外众多学者对构建复杂地形 CFD 网格开展了一些研究. 如 F. Scargiali 等<sup>[1]</sup>研究了大范围复杂地形中有害气体泄漏扩散的过程;程雪玲等<sup>[2]</sup>通过编程提取出等高线图的地形高程数据,并用 Gambit 的 Journal 功能生成 CFD 网格;史明昌等<sup>[3]</sup>研究了数值高程模型 DEM 网格尺寸对 DEM 精度的影响. 针对目前大多数研究所生成的地形网格精度不够的问题,本文研究的主要是:提取航拍原始图像三维坐标数据,根据数据地理坐标的不同,选择实地参照点,使用七参数验证的方式将其转化为 CFD 前处理器 Gambit 能识别的地方平面直角坐标点云,再使用编程方式,应用 Gambit 的 Journal 功能完成复杂地形的 CFD 网格生成,并对网格进行优化处理,为后期 CFD 精细数值模拟使其可应用于微尺度区域下的能源评估打下基础。

## 1 数据的获取和转换

### 1.1 数据的获取

本研究数据来源为美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量发布的 SRTM (shuttle radar topography mission)数据. 数据使用的水平基准面是 WGS84 椭球模型,覆盖范围为北纬 60°至南纬 56°,绝对水平和高程精度分别为 20 m 和 16 m. SRTM 地形数据按精度可以分为 SRTM1 和 SRTM3,对应的分辨率精度分别为 30 m 和 90 m 数据(目前公开数据为 90 m 分辨率的数据). 通过文献[4]对 SRTM 与不同比例地形图生成的数字高程模型 DEM(digital elevation model)的地形表达能力的比较得出:SRTM 虽然对地形的反映能力不能达到基于 1:100 000 地形图建立的 25 m 分辨率的 DEM (DEM25)和基于 1:50 000 地形图建立的 10 m 分辨率的 DEM (DEM10),但明显优于基于 1:250 000 地形图建立的 100 m 分辨率 DEM,适合于大比例尺的地形数据使用. SRTM 可以免费下载,易得到高精度数据,所以在地形网格生成中得到了广泛的应用. 本实例通过查询所研究区域的经纬度,下载 SRTM 数据,为真实地形网格生成提供数据来源. 图 1 为某地形卫星航拍图。

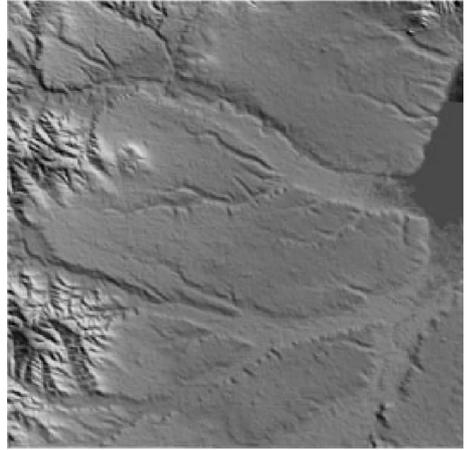


图 1 某地形卫星航拍图

### 1.2 数据的转换

为保证地形网格原始数据的准确性,本次研究采用地方坐标系数据作为地形网格生成的数据基础。

SRTM 数据采用 WGS84 大地基准地理坐标系,我国采用的多是西安 80 坐标系统,因此在从事地形网格生成时,需要将 SRTM 数据成果转换成我国的地方坐标系数据. 首先将 WGS84 大地基准地理坐标系转换为西安 80 坐标系统,在此基础之上再转换为带参照点的地方坐标系。

**1.2.1 数据准备** 根据坐标转换精度要求,本算例采用空间直角坐标转换方法,将 SRTM 数据格式(.tif)用 Globalmapper 软件读取,并输出 WGS84 空间直角坐标. 通常所下载的 SRTM 数据包括的面积要大于研究区域,因此数据导出时需选择重点关注的地形区域. 本算例选取 2 km × 2 km 重点区域导出 WGS84 空间直角坐标值,部分数据见表 1。

**1.2.2 七参数坐标转换模型** 坐标重合点采用在 2 个坐标系下均有的坐标成果点. 使用坐标转换软件 Coord MG 首次求得七参数,通过反复计算重合点坐标残差值来确定最终重合点,直到所有数据点坐标残差小于 3 倍中误差,即可确定最终七参数值。

由于坐标重合点存在误差,其点位的几何分布及点数量将影响求得的转换参数精度,因而为求得较好的转换参数,应选择一定数量精度较高且分布较均匀,并有较大覆盖面的重合点。

本研究选取了计算区域内均匀分布的 15 个已有的 WGS84 坐标对应西安 80 坐标的坐标成果点作为重合点,首先以此成果点作为公共点,计算七参数,源坐标类型为 WGS84 空间坐标(XYZ),目标坐

表1 某地区提取的空间直角坐标点  $m$

X	Y	Z
406 008. 501 74	130 238. 500 35	1 049. 889
406 018. 501 74	130 458. 500 35	940. 833
406 038. 501 74	130 548. 500 35	1 024. 500
406 258. 501 74	130 498. 500 35	952. 000
406 278. 501 74	130 138. 500 35	951. 417
406 348. 501 74	130 478. 500 35	948. 917
406 388. 501 74	130 738. 500 35	949. 583
406 468. 501 74	130 708. 500 35	947. 250
406 628. 501 74	130 848. 500 35	935. 167
406 718. 501 74	130 858. 500 35	933. 000
406 768. 501 74	130 268. 500 35	912. 500
406 838. 501 74	130 488. 500 35	924. 972
406 898. 501 74	130 228. 500 35	916. 833
406 948. 501 74	130 868. 500 35	907. 333
406 968. 501 74	130 708. 500 35	897. 000

标类型为西安 80 空间坐标( $XYZ$ ),求布尔莎七参数,误差数据见表 2. 剔除不符合精度的公共点后,确定最终的 6 个公共点,源坐标类型为 WGS84 空间坐标( $XYZ$ ),目标坐标类型为西安 80 空间坐标( $XYZ$ ),求得最终的布尔莎七参数<sup>[5-8]</sup>,误差见表 3.

使用误差最小的七参数进行数据坐标转换,获取西安 80 坐标值,以 MAPGIS 软件为平台进行投影转换,进行四参数转换,转换后的数据在一定程度上更接近实际地形. 由于数据高程为椭球高,测量中使用的高程为正常高,因此高程存在一定的差

异,需要进行拟合. 为保证整个地形网格生成的精准性,从 SRTM 数据提取大量数据点,进行高程曲面拟合,最终得到国家地方坐标( $XYZ$ )数据. 将地方坐标( $XYZ$ )中  $XY$  值的最低点分别设为  $XY$  轴零点, $Z$  值的近似最低点为  $Z$  轴零点,以此为基准,转换获取其他各点坐标,形成 Gambit 所能识别的三维坐标文件.

## 2 网格生成

本文采用基于三维点云数据,按照点—线—面—体方式生成地形网格的方法,在软件 Gambit 中进行质量检查和适当调整优化,以提高网格的精确度和实用性.

### 2.1 网格点的生成

应用编程方式实现 Gambit 绘制点命令 vertex create " vertex name" coordinates,结合 Gambit 的 Journal<sup>[2]</sup>文件功能,建立计算区域所有点并进行编号,结果如图 2 所示.

### 2.2 网格线的生成

根据前一步生成点的编号,建立绘制线的命令文件 edge create "line name" straight 和南北方向与东西方向的连线规则. 借助 Gambit 的 Journal 功能,调用生成网格线的程序文件,生成地形网格线,将所有的点进行四边形连接(如图 3 所示).

### 2.3 网格面的生成

在网格线生成的基础上,使用 Gambit 中的面生成命令行语句 face create "face name" wireframe 建

表2 15 个公共点求布尔莎七参数误差数据表

源坐标 X 误差	源坐标 Y 误差	源坐标 Z 误差	源坐标中误差	目标坐标 X 误差	目标坐标 Y 误差	目标坐标 Z 误差	目标坐标中误差
0.044	0.067	0.034	0.088	0.045	0.066	0.036	0.087
-0.024	-0.079	0.061	0.103	0.024	0.081	-0.059	0.103
0.161	0.057	0.034	0.174	-0.162	-0.055	-0.033	0.174
-0.037	-0.011	-0.003	0.039	0.036	0.013	0.005	0.039
0.049	0.083	-0.038	0.104	-0.049	-0.081	0.040	0.103
0.044	0.100	-0.054	0.122	-0.045	-0.098	0.055	0.121
-0.003	-0.072	0.064	0.096	0.002	0.074	-0.063	0.097
0.004	-0.069	0.056	0.089	-0.004	0.071	-0.054	0.090
-0.229	-0.036	-0.106	0.255	0.229	0.038	0.108	0.255
-0.027	-0.103	0.090	0.139	0.026	0.104	-0.089	0.139
-0.118	0.024	-0.100	0.157	0.117	-0.023	0.102	0.157
-0.010	-0.039	0.051	0.065	0.009	0.041	-0.050	0.065
0.164	0.081	0.022	0.184	-0.164	-0.079	-0.021	0.184
-0.023	-0.086	0.071	0.114	0.023	0.088	-0.070	0.115
-0.035	0.149	-0.121	0.195	-0.036	-0.147	0.123	0.195

表3 6个公共点求布尔莎七参数误差情况表

m

源坐标 X 误差	源坐标 Y 误差	源坐标 Z 误差	源坐标 中误差	目标坐标 X 误差	目标坐标 Y 误差	目标坐标 Z 误差	目标坐标 中误差
0.054	0.091	-0.046	0.116	-0.080	-0.090	0.047	0.115
-0.028	-0.066	0.041	0.083	0.028	0.068	-0.040	0.084
-0.051	-0.011	-0.017	0.055	0.050	0.013	0.019	0.055
0.031	0.076	-0.046	0.094	-0.031	-0.074	0.047	0.094
0.002	-0.060	0.050	0.078	-0.003	0.062	-0.048	0.078
-0.011	-0.019	0.025	0.034	0.011	0.021	-0.024	0.033

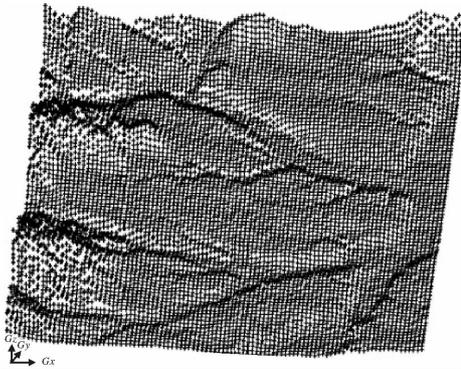


图2 Gambit 某计算区域点的绘制效果

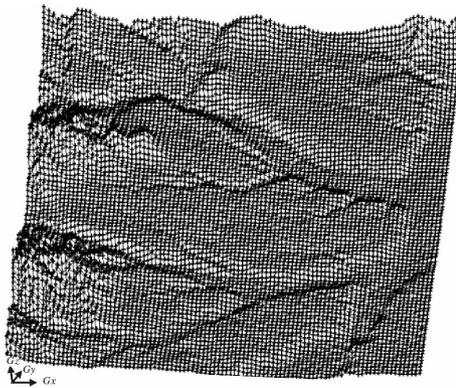


图3 网格线的绘制效果

立程序文件,经过 Gambit 的简单调用即可生成网格面,形成地形基本轮廓面,如图4所示。

### 2.4 网格体的生成

为生成所需的计算空间并进行网格划分,还需以地面为顶面构建一个包含下部空间的体,包括构建体的几何体和网格体的生成2个阶段。

1)构建体的几何体.根据生成的网格面在XY面上投影的大小确定建体所需长宽,高度的设定主要考虑最低点和最高点的海拔,而在进行数据点坐标转换时,所有数据点的海拔高度都经过减去接近于最低点海拔高度的处理.本算例设定高度近似为最高点与最低点的海拔差,绘制的体的底面顶点及

线条,如图5所示。

2)虚面、虚体的生成.为生成结构体网格,使用了 Gambit 中的虚面功能,应用 Gambit 的 Merge faces 功能将所有的四边形小面融合生成虚面<sup>[3]</sup>,即将原本不在同一面上的点拟合到同一曲面上,得到光滑的地形,从而生成便于计算的结构网格.虚体的生成(见图6),是在确定绘制的体的底面顶点坐标之后,根据坐标生成底面及生成体所需的4个侧面,并

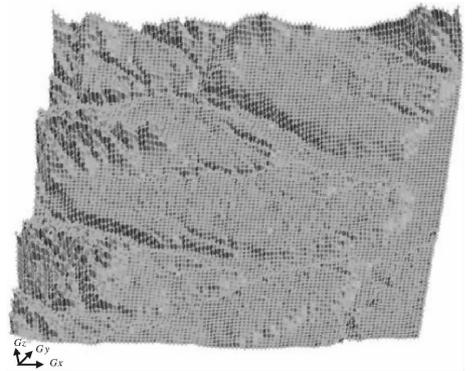


图4 网格面的绘制效果

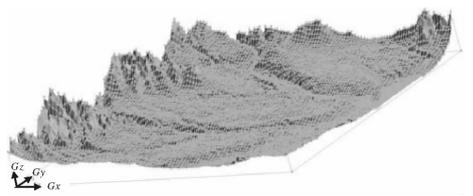


图5 网格体的范围效果

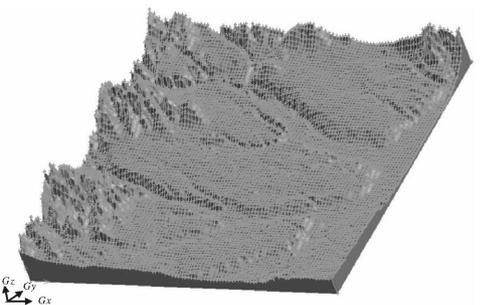


图6 网格虚体的生成效果

最终将整个地形曲面与底面侧面聚合生成网格体。至此,完成了 CFD 网格地形的构建,为网格划分奠定了基础。

### 3 网格优化

在一定程度上,网格质量的好坏将影响到计算收敛和网格计算精度。考虑到近壁黏性效应,为形成高质量的近地面贴体网格,采用等比数列分布方法对网格体竖直边进行网格划分,设置网格参数生成不同疏密程度的贴体网格,并对已生成的网格进行优化处理,包括质量检查和多面体网格转换 2 个过程。

首先将网格文件使用 Gambit 的 examine mesh 功能进行检查,然后导入到 CFD 软件中,使用 Fluent 的 grid quality 功能检查网格质量,结果证明网格质量较好<sup>[9-10]</sup>。

许多研究表明,多面体网格转化可显著减少网格的数量,提高计算速度及收敛性<sup>[11-12]</sup>,尤其针对大量六面体网格的 CFD 地形具有明显的优化效果。在确保 CFD 模型精确与高效的情况下,通过菜单 Mesh > Polyhedra > Covert Skewed Cells 修正计算域内歪曲度较大的六面体网格,形成更有效的 CFD 地形网格,效果如图 7 所示。

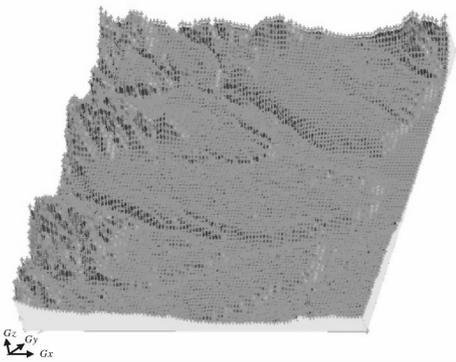


图 7 优化后效果图

### 4 结论

本文通过七参数求解方法将获取的 SRTM 三维地形坐标点数据转换成地方坐标点,根据 Gambit 软件中的命令行规则,使用 C 语言编程获取执行文件,并应用其 Journal 功能生成地形网格,不仅提高了地形数据精度,而且有效地提高了网格生成效率。网格生成的实例表明本文提出的方法是一种可

行的地形网格生成方法,降低了人工操作的复杂性,为 CFD 模拟应用的前处理问题提供了解决途径。

### 参考文献:

- [1] Scargiali F, di Rienzo E, Ciofalo M, et al. Heavy gas dispersion modelling over a topographically complex mesoscale: A CFD based approach [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2005, 83(3): 242.
- [2] 程雪玲, 胡非. 复杂地形网格生成研究 [J]. 计算力学学报, 2006, 23(3): 313.
- [3] 史明昌, 沈晶玉. 不同地貌起伏状况下网格尺寸与 DEM 精度关系研究 [J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 35.
- [4] 蔡清华, 杨勤科. SRTM 与地形图生成 DEM 的地形表达能力对比 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 183.
- [5] 谢鸣宇, 姚宜斌. 三维空间与二维空间七参数转换参数求解新方法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(2): 104.
- [6] 柳光魁, 王振禄, 赵永强, 等. 西安 80 坐标系与 WGS84 坐标系转换方法及精度分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(6): 167.
- [7] 赵宝锋. GPS 坐标向地方坐标转换模型的合理选择 [J]. 城市勘测, 2009, 24(2): 224.
- [8] 刘亚平, 郑若奇, 曹立强. GPS 定位中两种七参数坐标转换方法的误差分析 [J]. 中国港湾建设, 2002, 22(5): 24.
- [9] Coroneo M, Montante G, Paglianti A, et al. CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: numerical issues about the RANS simulations [J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35(10): 1959.
- [10] Gousseau P, Blocken B, Stathopoulos T, et al. CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2): 428.
- [11] Zhang Bo, Chen Guo-ming. Quantitative risk analysis of toxic gas release caused poisoning: A CFD and dose-response model combined approach [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010, 88(4): 253.
- [12] Zhang Bo, Chen Guo-ming, Kong Ling-zhen. Toxic gas dispersion modelling over complex terrains [C] // Proceedings of 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin: IEEE Computer Society, 2009: 135 - 138.