

文章编号:1673-5005(2011)05-0104-05

# 一种真实地形计算流体力学网格生成方法

章博<sup>1,2</sup>, 陈国明<sup>1,2</sup>, 孔令圳<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 海洋油气装备与安全技术研发中心, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 青岛 266555;  
3. 中国石油大学 机械与储运工程学院, 北京 102249)

**摘要:**随着计算流体力学(CFD)的应用领域逐步涉及到真实地形模拟,系统探讨如何生成及优化真实地形 CFD 网格也显现出重要意义。结合算例研究,提出一种通过获取及处理 GIS 数据,绘制点线面体等步骤生成真实地形网格的方法;强调对于所生成的网格,需采用网格依赖分析方法对比其计算精确性与经济性以实现优化选择;提出通过 CFD 前处理器二次开发形成真实地形 CFD 网格绘制软件以提高网格生成效率的建议。结果表明,所提方法生成的 CFD 网格与实际地形吻合程度高,可为真实地形 CFD 精细模拟应用提供可靠基础。

**关键词:**真实地形; 计算流体力学网格; 网格依赖

**中图分类号:** O 351.3      **文献标志码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.019

## A method for computational fluid dynamics grids formation on complex terrain

ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Guo-ming<sup>1,2</sup>, KONG Ling-zhen<sup>3</sup>

(1. Center for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;  
2. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;  
3. College of Mechanical and Transportation Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** As the applications of computational fluid dynamics(CFD) extend to the area of complex terrain simulations, it is important to systematically develop methods for CFD grids generation and optimization of complex terrains. Through a specific case study, a grid generation approach which contained steps of data acquisition, processing and conversion, construction of vertex, lines, faces and volumes, was presented. It was also stressed that the grid dependency study was important for choosing appropriate grids considering both the computation accuracy and costs. A suggestion of developing a software for complex terrain grids generation by redevelopment of current CFD preprocessors was also presented, which hopefully could enhance the grid generation efficiency significantly. The results show that the grid generated by this method agrees well with the complex terrain, and it could provide a solid foundation for CFD application in complex terrain simulations.

**Key words:** complex terrain; computational fluid dynamics grids; grid dependency

计算流体力学(CFD)研究的计算区域已由理想简化模型向真实复杂模型转化,复杂山区地形、真实城市建筑环境的模拟已成为重要的研究领域,研究如何构建真实地形 CFD 计算网格并使其满足 CFD 精细模拟要求具有重要意义。国内外学者对构建真实地形 CFD 网格开展了一些研究,如 Scargiali 等<sup>[1]</sup>研究了大尺度(数十千米范围)真实地形中有害气

体泄漏扩散的过程,程雪玲等<sup>[2]</sup>借助编程提取地形标高数据,并用 Gambit 的 Journal 功能生成网格,朱渊等<sup>[3]</sup>采用曲面拟合的方法构建了山区地形 CFD 网格,沈晶玉等<sup>[4-5]</sup>开展了使用数值高程模型 DEM 数据得到地形高度数据的研究,但目前多数研究所生成的网格精度欠佳,也缺乏对网格生成过程中具体技术细节的探讨。笔者提出一种真实地形 CFD

收稿日期:2011-02-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(10CX01001A);国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题(2008ZX05017)

作者简介:章博(1980-),男(汉族),湖北枝江人,讲师,博士,从事油气安全工程研究。

网格生成技术:获取 GIS 数据,转化为经度、纬度及海拔高度值,并选择参照点,转换为 CFD 前处理器所能识别的平面直角坐标系  $xyz$  坐标值,再编程处理构建从点到线、线到面、面到体,最后划分网格,实现真实地形网格构建。

## 1 GIS 数据的获取和转换

### 1.1 GIS 数据的获取

获取计算区域的 GIS 数据有航拍、现场测绘及参照共享数据库等方法。航拍可获取大范围高精度数据但成本较高;现场测绘适用于小范围高精度数据的获取;精度要求不高的大范围 GIS 数据获取则可参照免费共享数据库。本研究参照美国国家图像和测绘局(NIMA)同美国宇航局(NASA)发布的航天飞机雷达拓扑测绘(SRTM)地面高度数据。SRTM 公开数据的最高精度美国地区有 SRTM-1(1 弧秒),即将地面上 1 经纬度的面积分成  $3\ 600 \times 3\ 600$  个小区域,每一个小区域的大小是 1 弧秒;美国以外地区则是 SRTM-3,即 3 弧秒。可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 GIS 数据来源。本算例所选取研究区域真实地形卫星照片如图 1 所示。



图 1 某复杂地形卫星照片

Fig.1 Satellite picture for a complex terrain

### 1.2 GIS 数据的转换

SRTM 数据格式为 .tif.gz,用 Globalmapper 软件读取并输出代表经度、纬度坐标和海拔高度三者所组成的大地坐标。通常下载所得 SRTM 数据所包括的面积要大于研究区域,导出数据时则需选择所需重点关注的经纬度范围。本算例选取  $7.2\text{ km} \times 4.5\text{ km}$  重点区域导出经纬度及海拔高度,部分数据如表 1 所示。

要得到能够导入 CFD 前处理器 Gambit 的数据,需通过编程处理实现格式转换,转变为 Gambit 能够识别的所研究区域的长( $x$ )、宽( $y$ )、高( $z$ )坐标。选取其中一点为坐标原点(0,0),采取以下算

法计算与坐标原点距离后,转换获取  $xy$  坐标:

$$\text{南北方向纬度差} \times 2\pi / 360 \times \text{地球半径}, \quad (1)$$

$$\text{东西方向经度差} \times 2\pi / 360 \times \text{地球半径} \times \cos(\text{纬度值}). \quad (2)$$

将海拔高度最低点设为  $Z$  轴零点,以该点为基准,转换获取其他各点  $z$  坐标。按此方法可获取 Gambit 所能识别的三维  $xyz$  坐标。部分坐标如表 2 所示。

表 1 Globalmapper 导出的数据格式

Table 1 Data format exported from globalmapper

经度	纬度	海拔高度/m
107.7433163	31.54814684	337.437
107.7433163	31.5473135	331.448
107.7433163	31.54648017	335.711
107.7433163	31.54564684	360.077
107.7433163	31.5448135	379.780
107.7433163	31.54398017	373.632
107.7433163	31.54314684	357.586
107.7433163	31.5423135	346.852

表 2 转换后的 Gambit 所需格式

Table 2 Converted format required by Gambit m

$x$ 坐标	$y$ 坐标	$z$ 坐标
0	648.672	608.295
0	556.005	589.929
0	463.337	583.843
0	370.670	581.39
0	278.002	557.035
0	185.335	549.581
0	92.667	554.147
0	0	570.417

## 2 点、线、面和体的生成

### 2.1 点的生成

应用 Gambit 绘制点的命令“vertex create "vetex name" coordinates”,结合 Gambit 的 Journal 功能编程可实现点的绘制。按此原理编程将已转换完成的地形数据导入、建立点并编号。编程完成后使用 Gambit 的 Journal 文件功能即能导入计算区域所有点,效果如图 2 所示。

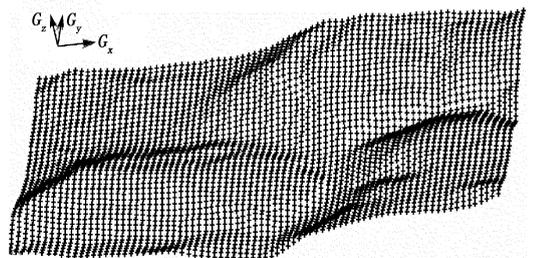


图 2 Gambit 绘制某区域地形点

Fig.2 Vertex of an terrain drawn by Gambit

### 2.2 线的生成

根据前一步生成点的编号进行线的生成,使用语句 edge create "line name" straight。按照确定的顺序对不同的连线进行标号,如定义南北方向的连线标号为“a\*”,东西方向为“b\*”,斜对角方向为

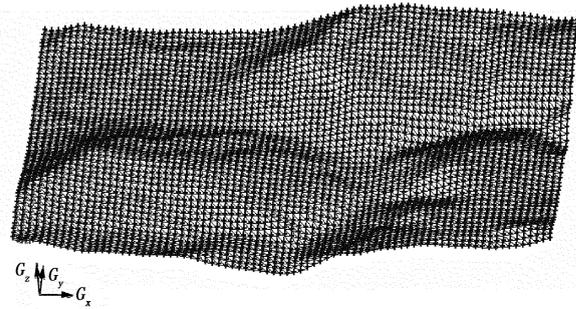
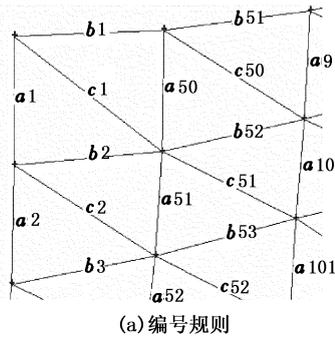


图3 线的生成

Fig.3 Lines generation

### 2.3 面的生成

由上一步生成的线,使用语句 face create "face name" wireframe 连接三条线生成一个三角形面,据此规则编程并用 Gambit 调用。面生成的效果如图4所示。通过与图1的对比可见,所绘制的地形图与卫星照片吻合程度好,能较为真实地还原真实地形特征。值得一提的是,本研究所采用的 GIS 数据分辨率为3弧秒(约90 m),若采用更高分辨率的 GIS 数据则可进一步提升所绘制地形的精度。对于城市建筑环境的 CFD 建模,采用本方法并结合航拍所得高精度 GIS 数据(如1 m),则能还原城市真实建筑环境,为精细模拟提供高质量网格。

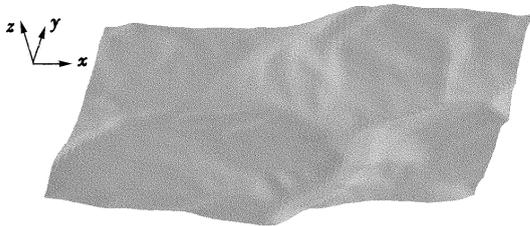


图4 面的生成效果

Fig.4 Faces generation

### 2.4 体的生成

为生成所需的计算空间并进行网格划分,还需以地面为底面构建一个包含上部空间的体,具体包括构建体的几何体、面的修剪和体的生成3个阶段。

(1)构建体的几何体。根据底面在 XY 面投影的大小确定建体所需长宽,高度的设定要考虑最低点和最高点的海拔,也要保证 CFD 计算所需的上部空间。本算例设定高度为1 km,绘制的体如图5所

“c\*”,如图3(a)所示。按点编号和对线编号的要求,进行语句的编写并用 Gambit 的 Journal 功能调用即可完成线的生成。按照以上原理,编程对导出的地形数据进行连线,效果如图3(b)所示。

示。

(2)面的修剪。通过构建地面的原理可知,由于地球表面为球面,则在将其展开为平面的过程中会使位于计算区域最外侧经线上点的 x 坐标随着 y (纬度)值的增大而逐渐变小。地面在 XY 面上的投影成为梯形,地面与体最外侧相交,如图6(a)所示。为方便生成体和网格,需对地面进行修剪。

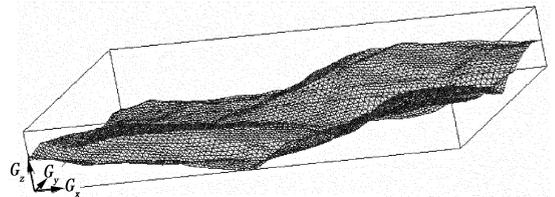


图5 面上所建的体

Fig.5 Volume constructed on surface

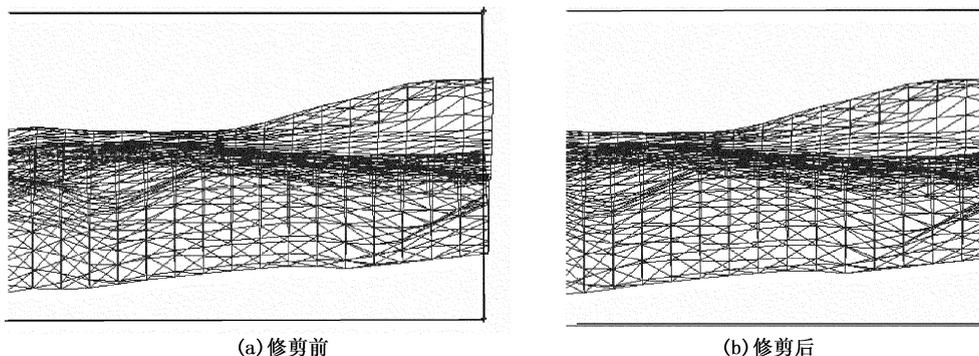
采用的 Gambit 的 Unite faces 功能对地面进行修剪。计算区域最右侧的面对所有与之相交的地面进行 Unite faces 运算,再将突出体之外的部分删除,即可完成对地面的修剪。根据 Unite faces 编写 Journal 语句,修剪前后的效果比较如图6所示。

(3)虚面、虚体的生成。Gambit 中提出的虚面(virtual face)、虚体(virtual volume)的概念使得 Gambit 的建模和网格生成的灵活性大大增加。为提高地面网格的划分精度和效率,可将地面上所包括的所有的三角形小面整合为一个虚面。应用 Gambit 的 Merge faces 功能融合生成虚面后的效果如图7所示。

生成虚面后,将虚面与体的每个侧面进行分割,将高度低于虚面以下的部分删除,将地面以上部分

生成封闭的虚体,作为 CFD 计算区域,如图 8 所示。至此,已完成了真实地形 CFD 计算空间的构建,为

网格划分奠定了基础。



(a)修剪前

(b)修剪后

图 6 底面修剪前后效果对比

Fig. 6 Comparison of trimed underside and untrimed underside

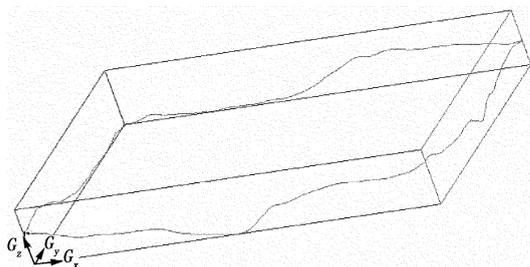


图 7 地面生成虚面效果

Fig. 7 Virtual surface of ground

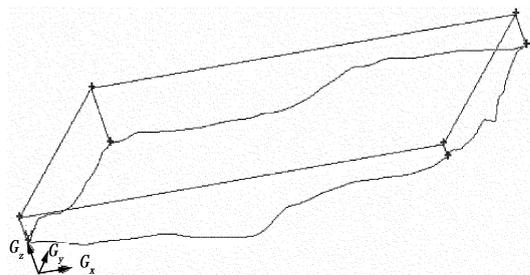


图 8 生成虚体效果

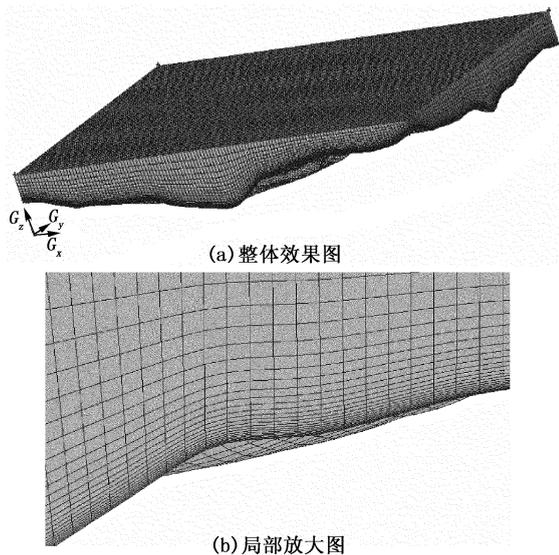
Fig. 8 Effect of virtual volume

### 3 网格生成及优化

为保证网格质量,需对近地面网格加密,采用等比数列分布节点的方法对竖直边进行网格划分,然后对竖直面进行网格生成,最后实现体的网格自动生成。调整网格生成中的参数可生成不同疏密程度的网格系列,其中一组网格如图 9 所示。针对已生成的网格有必要进行优化处理,常用方法包括质量检查、网格依赖分析及多面体网格 (Polyhedra) 转换等。

质量检查首先可使用 Gambit 的 examine mesh 功能,通过常见的判别指标如 equiangle skew, equisize skew 及 midangle skew 等判别所生成网格的质

量;然后将网格文件导入商用 CFD 软件进一步检测,如使用 Fluent 的 grid check 及 grid quality 功能,通过 maxium cell squish, maxium cell skewness 及 maxium aspect-ratio 等指标判别网格质量。本算例采用结构化网格划分方法,检查结果表明网格质量较好。



(a)整体效果图

(b)局部放大图

图 9 计算区域网格示意图

Fig. 9 Sketch map of meshes of computational domain

在一定范围内增加网格分辨率可提高计算精度,但超过某限定值后再提高计算精度则需要付出较大的计算成本;在一定范围内降低网格分辨率可提高计算速度,但超过某限定值后再降低分辨率则会导致计算精度受较大影响。网格依赖分析的目的在于辨别 CFD 计算结果是否依赖于网格质量,寻求计算精度及计算成本的平衡点,是确保 CFD 模型正确性及高效性的重要步骤,正受到国外学者的密切关注<sup>[6-8]</sup>。尤其在网格应用于大规模工程计算之前,

应通过网格依赖分析使得所选用的网格兼具计算精确性和经济性。网格依赖分析的典型方法为:划分一组不同疏密程度的网格,对重点及总体计算区域网格赋予不同的分辨率;按照研究问题构建 CFD 模型并进行试算,监测所关心的 CFD 求解重点参数是否随网格不同而变化;最后根据依赖性分析的结果综合考虑精度及计算成本以确定最佳网格,通常可选取计算结果不依赖于网格变化的最低数量网格供后继计算使用<sup>[9]</sup>。

近年来多面体网格技术已成为 CFD 领域发展的新方向,诸多研究表明,采用多面体网格可显著降低网格数量,提高计算速度及收敛性<sup>[9-10]</sup>。所生成的真实地形网格系列通过依赖性分析选定合适疏密程度的网格后,可使用现有商业 CFD 软件或网格生成软件实现多面体网格的转换,为后继高效计算奠定基础。

## 4 结束语

提出一种通过将真实地形 GIS 数据编程处理并导入 CFD 前处理软件构建计算区域几何体并完成划分网格的方法。该方法不仅可用于山区地形 CFD 网格生成,也可借助高精度航拍测绘数据用于构建真实城市建筑环境 CFD 网格,为开展真实地形 CFD 精细模拟奠定了可靠基础。

从原理上提出了一种绘制真实地形 CFD 网格的方法,随着真实地形网格 CFD 应用需求的逐渐增加,可考虑基于 CFD 前处理软件的二次开发,通过软件实现从下载 GIS 数据到数据提取处理、及点线面体几何体构建并划分网格的全过程,大幅提高真实地形网格生成的效率。

## 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): 242-256.
- [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): 313-316.  
CHENG Xue-ling, HU Fei. The study of grid formation on complex terrain[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006, 23(3): 313-316.
- [3] ZHU Y, GUO Ming C. Simulation and assessment of SO<sub>2</sub> toxic environment after ignition of uncontrolled sour gas flow of well blowout in hills[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/3): 144-151.
- [4] 沈晶玉,史明昌. DEM 网格尺寸对地形因子影响研究:以北京市延庆县八达岭小流域为例[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 66-69.  
SHEN Jing-yu, SHI Ming-chang. Studies of the influences from the size of DEM grids on topographical factors: take the Badaling watershed of Yanqing Beijing as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5): 66-69.
- [5] 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): 35-38.  
SHI Ming-chang, SHEN Jing-yu. Studies on the relations between the grids size of various undulate landforms and the accuracy of DEM [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 35-38.
- [6] 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): 1959-1968.
- [7] 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): 428-438.
- [8] 潘沙,冯定华,丁国昊,等. 气动热数值模拟中的网格相关性及其收敛[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 493-499.  
PAN Sha, FENG Ding-hua, DING Guo-hao, et al. Grid dependency and convergence of hypersonic aerothermal simulation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 493-499.
- [9] 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): 253-262.
- [10] ZHANG Bo, CHEN Guo-ming, KONG Ling-zhen. Toxic gas dispersion modelling over complex terrains: proceedings of 2009 International Conference on Energy and Environment Technology[C]. Piscataway: IEEE Computer Society, c2009: 135-138.

(编辑 修荣荣)