



硕士学位论文

基于多波束声呐数据的海底
三维地形模型构建

Construction of Seabed 3D Terrain Model based on
Multi-beam Sonar Data

作 者：薛秋珍
导 师：王晓 副教授
何林帮 副研究员

江苏海洋大学

2022 年 5 月

中图分类号 TP311.1

学校代码 11641

UDC

密 级 公开

江苏海洋大学

硕士学位论文

基于多波束声呐数据的海底
三维地形模型构建

Construction of Seabed 3D Terrain Model based
on Multi-beam Sonar Data

作 者 薛秋珍

导 师 王晓、何林帮

申请学位 工学硕士学位

培养单位 海洋技术与测绘学院

学科专业 测绘工程

研究方向 海洋空间信息技术


答辩委员会主席 卢华兴

评 阅 人 高祥伟、季民

二〇〇二年五月

论文审阅认定书

研究生薛秋珍在规定的学习年限内,按照研究生培养方案的要求,完成了研究生课程的学习,成绩合格;在我的指导下完成本学位论文,经审阅,论文中的观点、数据、表述和结构为我所认同,论文撰写格式符合学校的相关规定,同意将本论文作为学位申请论文送专家评审。

导师签字: 

2022年5月30日

致谢

毕业论文是对我们研究生三年学习的综合检验，是考察每位同学在理论知识、实践技能、逻辑思考等方面的收获与运用。在写作过程中，我运用专业性的理论知识，认真学习，与导师、同学们进行交流讨论，这些过程都让我受益匪浅。我也曾因为找不到想要的数据而苦恼，也曾因为得不出结果而烦躁，但坚持让我克服了每一个关卡。在这研究生的最后一段时光里，我的生活因为毕业论文而变得充实圆满。

在论文完成之际，我要感谢那些指导、帮助我的老师、同学、朋友们。首先，感谢我的指导老师王晓老师，从开学前确定导师后，王晓老师便亲切和蔼与我进行了交流，并且贴心的询问我开学行李寄运是否需要帮助，虽然这只是一件小事，但却让我牢记三年，未曾谋面，便已对王晓老师怀有敬意与感谢。感谢王晓老师在我研究生三年期间，在学业上提供的帮助和指导，在生活上给予关心和照顾，同时也十分感谢校外指导老师何林帮老师，在论文开题、中期修改过程中对我提出了非常中肯的意见和建议。还要感谢同门陈钰同学、李书东同学、刘宇航同学，舍友王菊荣同学、邢雪婷同学在校期间提供了帮助和关心。最后感恩我的父母和姐姐一直以来的支持和爱，感谢挚友林梦钦、王启铭的鼓励和陪伴。

即将告别在江苏海洋大学三年的时光，感谢母校在我生命里留下深刻的记忆，见证我的成长。无论未来我在哪里，从事什么职业，都不会忘记研究生三年带给我的成长。

摘 要

对海底地形进行高精度测量是人类对于海洋探索、海底资源开发、海洋工程设计、海战场虚拟环境建设的一个重要前提。不同于其他测量技术，多波束凭借其广角发射信号和多组阵换能器，通过合理的布设测线之间的距离，形成条带式数据，可实现对海底全覆盖高精度测量。本文基于多波束声呐测深系统获得的海底数据对海底地形进行三维构建方面的研究。

首先，通过介绍多波束声呐测深系统的工作原理和系统构成部分，进一步了解多波束声呐测深系统测量获得的存储于 XTF 文件格式的原始数据，对原始数据进行分析、解码、提取数据，并简单阐述多波束声呐数据的处理步骤，为后续进行高精度的海底三维地形模型构建获取高精度的水深数据。

其次，阐述了数字高程模型的原理，并在此基础上分析比对规则格网建模和不规则格网建模两种不同的构建地形方法。对于规则格网建模方法的分析主要包括反距离加权插值算法、克里金插值算法、自然邻点插值算法三种插值。在不规则格网建模方法方面，主要分析了 Delaunay 三角网，以及 Delaunay 三角网的三种算法，三角生长法、逐点插入法、分治算法，并且对这三种算法在运算过程中存在的问题提出分析与改进，最后提出一种合成算法生成 Delaunay 三角网。

最后，分析三种规则格网进行建模的效果，考虑影响构网建模的精度、速度等方面因素，认为反距离加权插值算法的建模效果最好。结合多波束声呐数据的特点和不同数字高程模型建模方法的适用性，最终通过 Delaunay 三角网的合成算法构建较好的海底地形三维模型。

该论文有图 24 幅，表 4 个，参考文献 71 篇。

关键词：多波束声呐；海底三维地形；规格格网建模；不规则格网建模；Delaunay 三角网

Abstract

The measurement of seabed topography is an important prerequisite for human beings to explore the ocean, develop seabed resources, design marine engineering, and build a virtual environment for the sea battlefield. Different from other bathymetric surveys, multi-beam, by virtue of its wide-angle transmission signal and multiple array transducers, can form strip data by reasonably laying the distance between the survey lines, which can achieve high-precision measurement of full coverage of the seabed. Based on the seabed data obtained by the multi-beam sonar bathymetry system, this paper studies the three-dimensional construction of the seabed topography.

First of all, by introducing the working principle and system components of the multi-beam sonar sounding system, we will further understand the original data stored in the XTF file format obtained by the multi-beam sonar sounding system, analyze, decode. This paper briefly describes the processing steps of multi-beam sonar data, and obtains high-precision water depth data for the subsequent construction of high-precision three-dimensional topography model of the seabed.

Secondly, the principle of digital elevation model is expounded, and on this basis, two different methods of constructing terrain, regular grid modeling and irregular grid modeling, are analyzed and compared. The analysis of regular grid modeling methods mainly includes three kinds of interpolation: inverse distance weighted interpolation algorithm, Kriging interpolation algorithm, and natural neighbor interpolation algorithm. In terms of the modeling method of irregular grid, the Delaunay triangulation and three algorithms of Delaunay triangulation, the triangle growth method, the point-by-point insertion method, and the divide and conquer algorithm are mainly analyzed, and the existence of these three algorithms in the operation process is analyzed. Analysis and improvement of the problem are proposed, and finally a synthetic algorithm is proposed to generate the Delaunay triangulation.

Finally, the modeling effect of the three regular grids is analyzed, and the modeling effect of the inverse distance weighted interpolation algorithm is considered to be the best considering the factors affecting the accuracy and speed of the network modeling. Combined with the characteristics of multi-beam sonar data and the applicability of different digital elevation model modeling methods, a better three-dimensional model of seabed terrain is finally constructed through the synthesis algorithm of Delaunay triangulation.

Keywords: multi-beam sonar bathymetric system; seafloor 3D terrain; regular grid net; irregular triangulation net; Delaunay triangulation

目 录

摘 要	I
目 录	III
图清单	VII
表清单	IX
1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	1
1.3 国内外研究现状及分析	2
1.4 本文研究目的及内容	5
2 多波束声呐系统简介及数据预处理	7
2.1 多波束声呐测深系统构成	7
2.2 多波束声呐测深系统工作原理	8
2.3 多波束声呐数据解码	10
2.4 多波束声呐数据处理	14
2.5 多波束声呐数据的特点	17
2.6 本章小结	17
3 海底地形建模技术的研究	19
3.1 数字高程模型	19
3.2 基于规则格网插值方法	20
3.3 基于不规则格网方法	22
3.4 Delaunay 三角网的合成算法	25
3.5 本章小结	27
4 海底三维地形建模	29
4.1 基于规则格网进行建模	29
4.2 精度评估	32
4.3 基于 Delaunay 三角网合成算法进行建模	32
4.4 本章小结	36
5 总结与展望	37

5.1 总结	37
5.2 展望	37
参考文献	39
作者简介	43
学位论文原创性声明	44
学位论文数据集	45

Contents

Abstract.....	I
Contents.....	III
List of Figures.....	VII
List of Tables.....	IX
1 Introduction.....	1
1.1 Research background.....	1
1.2 Research significance.....	1
1.3 Current situation and analysis of domestic and international research.....	2
1.4 The research purpose and content of this paper.....	5
2 Introduction and data preprocessing of multi-beam sonar system.....	7
2.1 Composition of multi-beam sonar bathymetry system.....	7
2.2 Working principle of multi-beam sonar bathymetry system.....	8
2.3 Decoding of multi-beam sonar data.....	10
2.4 Multi-beam sonar data processing.....	13
2.5 Characteristics of multi-beam sonar data.....	17
2.6 Summary of this chapter	17
3 Research on seabed terrain modeling technology.....	19
3.1 Digital Elevation Model	19
3.2 Interpolation method based on regular grid.....	20
3.3 Method based on irregular grid.....	22
3.4 Synthesis Algorithm of Delaunay Triangulation.....	25
3.5 Summary of this chapter.....	27
4 Three dimensional modeling of seabed topography.....	29
4.1 Modeling based on a regular grid.....	29
4.2 Accuracy evaluation.....	32
4.3 Modeling Based on Delaunay Triangulation Algorithm.....	32
4.4 Summary of this chapter.....	36
5 Conclusions and Prospect.....	37
5.1 Conclusions.....	37

5.2 Prospect.....	37
References.....	39
Author's Resume.....	43
Declaration of Thesis Originality.....	44
Thesis Data Collection.....	45

图清单

图序号	图名称	页码
图 2-1	多波束声呐系统的组成	7
Figure 2-1	Composition of multi-beam sonar system	7
图 2-2	多波束声呐测深系统工作原理示意图	9
Figure 2-2	Schematic diagram of the operating principle of the multi-beam sonar sounding system	9
图 2-3	XTF 文件格式结构图	11
Figure 2-3	Structure diagram of XTF file	11
图 2-4	XTF 格式文件解码流程图	13
Figure 2-4	XTF file decoding flowchart	13
图 2-5	解码得到的水深数据	14
Figure 2-5	The water depth data of decoded	14
图 2-6	多波束声呐数据的处理流程图	15
Figure 2-6	Process flow chart of multi-beam sonar data	15
图 2-7	Snell 折射定律图	16
Figure 2-7	The diagram of Snell law	16
图 3-1	蓝色线为 Voronoi 多边形 紫色线为 Delaunay 三角网	23
Figure 3-1	The blue line is the Voronoi polygon and the purple line is the Delaunay triangulation	23
图 3-2	三角网生长算法过程	24
Figure 3-2	Triangulation network growth algorithm process	24
图 3-3	利用正负区搜索点	24
Figure 3-3	Using the positive and negative areas to search for points	24
图 3-4	逐点插入算法过程	25
Figure 3-4	Point-by-point insertion algorithm process	25
图 3-5	合成算法思路图	26
Figure 3-5	Synthesis algorithm idea diagram	26
图 3-6	初始三角网的生成过程	27
Figure 3-6	The generation process of the initial triangulation	27
图 4-1	反距离加权插值法	29
Figure 4-1	Inverse distance weighted interpolation method	29
图 4-2	自然邻点插值法	30
Figure 4-2	Natural neighbor interpolation method	30
图 4-3	克里金插值法	30
Figure 4-3	Kriging Interpolation Method	30
图 4-4	基于反距离加权插值水深地形图	31
Figure 4-4	Bathymetric topographic map based on inverse distance weighted interpolation	31

图 4-5	基于自然邻点插值水深地形图	31
Figure 4-5	Bathymetric topographic map based on natural neighbors	31
图 4-6	基于克里金插值水深地形图	31
Figure 4-6	Bathymetric topographic map based on kriging interpolation	31
图 4-7	原始水深图	33
Figure 4-7	Original water depth map	33
图 4-8	生成 Delaunay 三角网（局部）	33
Figure 4-8	Generate Delaunay triangulation (partial)	33
图 4-9	传统逐点插入算法生成地形图	34
Figure 4-9	Traditional point-by-point interpolation algorithm to generate terrain map	34
图 4-10	改进合成算法生成地形图	34
Figure 4-10	Improved synthesis algorithm to generate terrain map	34
图 4-11	海底地形图	35
Figure 4-11	seabed topographic map	35

表清单

表序号	表名称	页码
表 2-1	Sonic2024 测深系统参数	10
Table 2-1	Sonic2024 sounding system parameters	10
表 3-1	规则格网与不规则格网的对比	20
Table 3-1	Comparison of regular and irregular grids	20
表 4-1	三种插值的中误差值	32
Table 4-1	Median error values of three interpolations	32
表 4-2	传统逐点插入算法与合成算法的构网时间	34
Table 4-2	Comparison of regular and irregular grids	34

1 绪论

1 Introduction

1.1 研究背景（Research Background）

如果抽干海水，海底会是什么样子呢？

海底地形和陆地地形一样是高低起伏，变化多样的，初高中时期我们通过课本都学习认识过陆地地形，并且对陆地地形的基本地形、地形地貌图、地形模型以及如何测量绘制地形图等方面有了一定的了解。但是对于海底地形，我们仍然处于未知和探索的阶段。从党的十八大提出“建设海洋强国”到我国首台载人潜水器“蛟龙”号成功在海底开展作业，再到“海斗”号自主遥控水下机器人下潜实验，我国在海洋技术研究方面不断取得突破性进展，不断探索深海奥秘。

海底地形测量是人类对于海洋探索、资源环境开发、海洋工程设计、海战场虚拟环境建设等活动开展的一个重要手段^[1]。由于海洋中存在巨大的水体，很难直接穿过水体到达海底进行测量，并且电磁波会受到水体的屏蔽作用，因此陆地上的众多测量技术方法很难应用在海底探测方面，只能在海水表面进行简单的探测^[2]。对于海底地形的探测，人类最早是通过竹竿法、铅垂法等利用物体直接接触及海底的方法来测量海水深度，但这种测量方法难以准确获取深度信息，更加难以获取大范围的详细的海底地形地貌，所以在很长一段时间内我们对海洋深处一无所知。直到 19 世纪 20 年代利用回声测深仪获取水深数据才开始具有准确的测量意义^[3]。

长期以来，传统单波束回声测深技术在海底地形测量中发挥了重要的作用，但是单波束存在测量时间长、成本高、精度低、信息量少等问题，已经无法满足海洋经济发展、海洋权益争夺和海洋规划管理日益增长的新需求。国际海道测量组织（IHO）在总结当代海洋测量技术发展水平的基础上，于 1994 年 9 月的摩纳哥会议上制定出新的水深测量标准，规定在高级别的水深测量中必须使用多波束全覆盖测量技术^[4]。多波束测深系统作为海底地形地貌勘测的主要设备之一，在海底地形探测领域发挥着重要作用。多波束测深系统可以对海底进行高精度、全覆盖、无遗漏的测量，获得的数据量巨大，所以对多波束测深系统的测量原理、数据处理技术等进一步进行深入研究是十分迫切和必要的^[5]。对多波束测深数据进行处理获取高精度、高分辨率、高可靠度的多波束声呐图像并进行图像配准，则能获取大面积的精细的水下地形地貌声呐图，从而为构建高精度的海底三维地形模型提供可靠的保障。

1.2 研究意义（Research Significance）

在人类生存的地球上，大约有 71% 的地球表面是被浩瀚的海洋所覆盖。海洋拥有丰富的水资源，约占地球总含水量约 97%。海洋不仅蕴藏丰富的化学资源、生物资源、矿产资

源、动力资源等,同时还具有调节气候,净化环境等方面的功能,海洋活动与人类生活息息相关^[6]。然而,对于海洋研究的意义不仅限于此。首先,海洋中保存着地球环境演变过程中留下的各种各样的“历史档案”,海底沉淀物质对于地球演变过程、人类活动变化、“板块”理论和洋底扩张假说提供了决定性的证据依据。其次,海底滑坡、海洋地震等海洋灾害的发生不仅对钻井平台、海底光缆、港口、码头等设施产生损害,而且会引发巨浪,甚至海啸,对人类生命财产安全造成直接危害^[7]。

海洋活动的开展前提要求对海底地形有充分了解。因此,对海底进行探测,获取海底地形有着重要的作用。多波束声呐测深系统作为海底地形地貌勘测的主要设备之一,在海底地形探测领域发挥着重要作用。多波束声呐测深系统可以对海底进行高精度、全覆盖、无遗漏测量,获得的数据量巨大,所以对多波束测深系统的测量原理、数据处理技术等内容进行深入的研究是十分迫切和必要的。对多波束声呐测深数据进行处理获取高精度的水深数据,从而为构建海底三维地形模型提供可靠的保障。

随着信息科学、计算机图像学、GIS等相关学科的不断发展,海底地形三维可视化技术得到了研究人员极大的重视。通过三维建模技术,可以将离散的不规则分布的水深数据进行构网生成海底三维地形模型,进而生成丰富逼真的虚拟海底三维场景,为海洋开发和相关研究提供可靠的资料。高精度的海底三维地形模型对于海洋矿产资源的探索、海洋环境保护、海洋航道的建设、海洋战场虚拟环境的建设等众多海洋活动有着很大的帮助。海底热泉、海底麻坑方面的研究也是基于高精度的海底三维地形图。通过三维可视化表达,可以拓展人类对海洋空间的认知,使人们更容易地认识海底地形的起伏变化情况;通过建立可视化模型并进行精度分析,可以在内插算法方面有效地提高模型的效率和可用性,对地形建模技术提供有益的参考建议;通过多波束声呐数据的可视化表达,为其他有关海洋视景仿真系统提供数据模型支持^[1]。

1.3 国内外研究现状及分析(Current situation and analysis of domestic and international research)

随着计算机、计算机图形学、计算算法、现代数学等理论的进步,各种数字地形的表达方式得到迅速发展,海底地形的制图方式及用图概念也随之发生了巨大的变化。人们对海底地形的认识需求与表达方式逐渐从传统二维、静态的等深线图转向三维、动态的真实感海底地形图。

因为多波束声呐测深系统所采集的数据量十分巨大且数据点分布呈离散不规则分布。为了实现海量数据量离散数据的海底三维地形模型建模,国内外研究人员进行了大量的研究,主要有两种方式:一种是对离散数据进行格网化处理,利用离散分布的原始测量数据点的水深数据获得测区范围内规则网格位置上的水深数据,然后基于规则网格进行海底地形建模。规则网格化处理的实质是对水深数据进行内插处理,使离散分布的数据点变为规则栅格分布,这种处理方法虽然可以简单方便的进行地形建模,但是经过内插处理的水深

数据不可避免地会损失一定的精度,从而导致由此所构建的地形与实际地形有所出入。因此研究人员开始采用另一种方式进行海底三维地形模型的构建,即直接对不规则分布的离散测深数据点进行基于不规则三角网的海底三维地形建模。虽然不规则三角网构网算法比较复杂,但是它能够较好的保留地形信息,因而得到越来越广泛的应用。Delaunay 三角网构网能够最大限度地避免出现狭长三角形并使生成的三角形形状趋于等边三角形,同时能够保证所构成的三角网具有唯一性,因此在地形拟合方面表现极为出色。

1.3.1 国外研究现状

国外在三维数字地形建模方面的研究起步较早。1958 年,美国学者 Miller 和 LaFamme 发表论文“The digital terrain model-theory and application”,首次提出一种数字地形表达的概念,即数字地形模型^[8]。之后的几十年,各个领域的专家学者在数字地形建模和三维可视化方面进行了大量的研究工作,使三维地形可视化技术的理论和应用得以迅速发展,以多波束声呐测深数据作为数据源的海底三维地形模型技术与软件研发等方面也得到了迅速的发展。

早期大多数国家的研究学者对于海底三维地形建模都是基于规则格网建模的方法,John F. O'Callaghan^[9]、Jepson S. K^[10]、David G. Tarboton^[11]等人通过提取地形特征的方法对规则格网建模进行了研究。1992 年 Schroeder 提出一种删除顶点的网格方法,对网格算法进行了简化^[12]。之后 Hoppe 在 ACM 会议上提出渐进网格算法,通过自上而下的层次结构把需要的细节加入到网格中,简化数据结构。对于规则格网构建地形模型的插值研究也是一大重点研究方向,众多研究学者基于传统插值算法不断提出改进算法,George Y. Lu 提出了一种自适应反距离加权插值算法^[13];Kidner 比较分析了多项式阶次与所建模精度之间关系,证明了高次阶函数插值生成的地形模型精度较高^[14]。虽然规则格网构网简单,但是在构网所耗费的时间方面仍有提升的空间,Agarwal 等人通过引入一种 I/O 算法生成规则网格用于提升构网的速度^[15]。Alex 等人采用自然领域内插算法构建规则格网,并且采用 GPU 加速提升构网的速度^[16]。规则格网有着计算复杂度低、构网简单、数据结构简单等优点,但因为其构网简单,面对复杂地形时难以精准拟合地形。

对于不规则三角网建模的研究,最常见的就是 Delaunay 三角网。1978 年,Green 和 Sibson 第一次实现了 Voronoi 图的三角网生长法^[17]。后来,McCullagh 和 Ross 改进了点的搜索方法,对点集进行分块处理,减少了搜索时间^[18]。Mirante 和 Weigarten 提出了径向扫描算法,从随机分布的离散点集的外部边界开始,由外向内建立三角网^[19]。Moore^[20]、Thibault^[21]等针对数字化地形图提出了基于等高线提取不规则三角网的算法。1997 年,Lawson 提出逐点插入法建立 Delaunay 三角网,思路是在一个包含所有离散数据点的初始多边形中,将未处理的点逐个加入到已存在的三角网中,每插入一个点后重新定义三角网,保证生成的三角网是 Delaunay 三角网^[22]。1975 年,Shamos 和 Hoery 基于 Voronoi 图的构建,提出了分治算法思想^[23]。此后,Dwyer 改进了分治算法,将数据分成垂直条块,进而

用相交边界将条块再次细分为区域,并应用带约束条件的 LOP 交换对角线,可以处理带约束条件的数据^[24]。Katajainen 和 Koppinen 改进了 Dwyer 的算法,采用四叉树进行点集分割与子网合并,但 Delaunay 子三角网的合并效率可能受四叉树叶子节点内的点分布不均匀的影响^[25]。在以上三种构建 Delaunay 三角网中,分治算法的构网速度是最快的,但是数据处理时占用内存大,工作量大^[26]。

各个领域的专家、学者在地形建模和三维可视化方面做了大量的研究工作,使三维地形模型的理论和应用得到飞速发展。目前,国外多波束声呐设备公司与一些专业的多波束声呐后处理成图软件公司已经将各种多波束声呐成图软件推向了商业领域。由于多波束测深数据量巨大以及不规则三角网构网算法的复杂性,20 世纪 90 年代国外海底地形成图软件中大都采用先将不规则离散分布的测深数据先进行网格化处理,然后再进行基于简单数据结构的规则格网进行海底地形模型建模来实现海底地形可视化。进入 21 世纪后,随着计算机处理性能的快速提高与不规则三角网构网算法研究的展开,国外绝大部分成图软件转为采用能更好的保留地形细节特征的基于不规则三角网的海底地形模型建模来实现海底地形成图。

1.3.2 国内研究现状

关于规则格网算法的研究国内学者也提出了许多方法。对于规则格网的插值算法,李新等人比较了不同的插值算法,并提出了不存在绝对最优的插值算法,要根据不同数据的特点对插值方法进行比较分析,而且还要对不同的插值结果做严格的检验^[27]。宋敦江等人提出了一种基于散乱数据的插值算法,并与反距离加权插值、克里金插值、样条函数插值三种传统插值算法的结果精度进行比较^[28]。在构网速度和精度方面,吴焕萍等人对离散点和三角网两种空间数据分别进行了分块索引、扫描线填充方法进行规则格网的构建,提高了构网的速度^[29]。王耀革等人则提出了基于 Coons 曲面的规则格网地形模型,先构建地形剖面的拟合曲线,再基于拟合曲线构建地形模型,以点到线再到面的方法提高地形模型的精度^[30]。

国内学者对不规则三角网算法也进行了大量的研究。何俊等人改进了生长算法中的前沿边推进算法,直接以边为基础向一侧推进,同时对数据进行分块技术改进了搜索方法,提高了 Delaunay 三角网的推进速度^[31]。祝志恒等人基于逐点插入法中影响域的概念,提出一种新的三角网生长算法——壳外插入法,通过查找生长边、内蚀既有网、重构三角网三个操作实现三角网的生长,克服了传统生长法需要查找第三点的缺陷^[32]。王会然针对大数据量构建三角网的效率问题,提出了一种多级索引的三角网生长算法,该算法逻辑结构简单,速度快^[33]。蒲浩等人通过建立网格索引并结合有向查找技术,研究出了三角形的快速定位算法,改进和优化了逐点插入算法^[34]。徐道柱采用数据点集分块管理、三角形快速定位、改变插入点顺序等方法优化了逐点插入算法^[35]。蒋红裴提出了一种基于 DEM 的对三维地面进行裁剪的分治方法,后来又提出一种构建三角网的分治算法,利用方格网管理离

散点数据, 仅需分布对每格中的点进行排序^[36-37]。

与陆地不同, 对海底地形进行测量、获得的测量数据特点、海底地形模型建模都有其特殊性。在传统陆地地形模型构建的方法上结合海底数据的特点, 对于海底地形模型建模进行了研究。孙岚等人基于多波束数据比较了不同的建模方法, 提出一种通过建立空间索引数据块并结合 MQS 插值算法构建海底地形模型^[38]。曹鸿博等人针对多波束数据的特点, 分别进行了规则格网和不规则三角网的建模, 利用数据分块对多波束数据进行快速检索构网^[39]。丁海燕分析了海底地形建模过程常见的问题, 通过坐标变换、接边处理、加密插值等数据处理方法生成海底地形模型^[40]。崔杨从海底地形模型的精度对建模进行分析, 并提出改进方法, 建立基于原始数据的海底地形模型^[41]。

我国在多波束海底地形成图技术方面起步较晚, 直到进入 21 世纪哈尔滨工程大学、海军大连舰艇学院、海军海洋测绘研究所、国家海洋局第二研究所等相关科研单位才展开海底成图技术方面的研究工作^[42-43]。陆丹等人通过对不规则分布的原始测深数据进行 Delaunay 构网并建立基于 TIN 的海底数字地形模型来实现真实感三维海底地形的可视化^[44-45]。欧建良基于超图结合地理信息系统对海底地形的特征进行提取, 然后构建数字高程模型, 利用三角网的拓扑结构将地形特征线进行连接得到完整清晰的地形特征线^[46]。2005 年王向红研制了一套全新型多波束测深系统数据后置处理及拼图软件, 主要研究空间数据平滑方法, 声线修正、潮位改正技术以及海底地形图成图前的网格生成方法和坐标变换方法, 实现了水深透视图、等深线图形和三维立体图的显示^[47]。胡清华研发了一套适合新型便携式多波束测深系统的后置数据采集处理和成图软件, 通过人工编辑和自动处理两种方式对多波束深度数据进行了处理^[48]。

从整体上来说, 我国的海底地形成图技术研究与国外发达国家相比还是有较大的差距。由于相关基础理论研究落后于国外, 我国还未出现具有商业水平的多波束数据后处理成图软件, 导致国内的多波束产品用户长期依赖国外的软件产品, 为更好的进一步提升我国的多波束声呐测深系统的整体研发水平, 开展多波束声呐海底三维地形模型研究具有重要的现实意义。

1.4 本文研究目的及内容 (The research purpose and content of this paper)

在了解和分析国内外研究现状的基础前提下, 首先对多波束声呐数据进行预处理, 获取高质量、高精度的多波束声呐条带图像, 其次对几种常用构建 DEM 算法进行具体分析, 最后针对多波束声呐数据的特点提出适合于多波束声呐数据建立海底三维地形模型的方法。论文具体内容安排如下:

(1) 介绍对海底三维地形模型建模进行研究的背景及意义, 介绍该领域的研究现状及发展趋势, 最后列出主要研究内容。

(2) 介绍多波束声呐测深系统测量的原理方法。分析多波束声呐数据存储的 XTF 文件的组织结构和内容, 对 XTF 格式数据进行解码, 将 XTF 格式数据转换成可读文件, 实

现数据的提取。

(3) 介绍几种常用的基于离散数据建立海底三维地形模型的方法：规则格网的反距离加权算法、克里金插值算法、自然邻点算法，Delaunay 三角网的生长算法、逐点插入算法、分治算法，比较分析各算法的特点，并且对海底多波束声呐数据的特点进行分析，提出改进算法。

(4) 在理论和算法研究的基础上，实现海底三维地形模型，并通过实验比较分析不同算法的实际建模效果和建模效率。

(5) 总结与展望。总结研究内容、采用的方法、对结果进行分析，并根据存在的不足做了简要的展望。

2 多波束声呐系统简介及数据预处理

2 Introduction and data preprocessing of multi-beam sonar system

多波束声呐测深系统进行测量获得的数据有各方面的，包含了水深观测数据、声剖面数据、测量船定位数据、船体姿态数据等，但是最后用来进行海底地形形成图所用的数据是水深数据。格式转换是数据处理的重要基础，本章将首先了解多波束声呐测深系统的组成部分以及测深原理，其次对存储于 XTF 文件格式的多波束声呐原始数据解析，将采集得到的原始多波束声呐数据文件转换成海底三维地形建模所需的水深数据。

2.1 多波束声呐测深系统构成（Composition of multi-beam sonar bathymetry system）

多波束声呐测深系统是一个专门用来开展海底地形状况调查的大型综合仪器设备，它通过控制系统向安装在船底的发射换能器发射出声波信号，再接收由海底反射回来的回波信号，根据声波信号在水下的传播时间来计算海底水深。多波束声呐测深系统通过一次性测量与船的航迹方向垂直平面内数十个以至上百个海底被测点的实际水深，从而获得一条具有一定宽度的水深测量条带。同时，多波束声呐测深系统还具有测量范围宽广、测量效率高快的优势，可以精准迅速的对海底目标进行测量，从而获得可靠真实的海底数据用来描绘海底地形的变化特征^[49]。

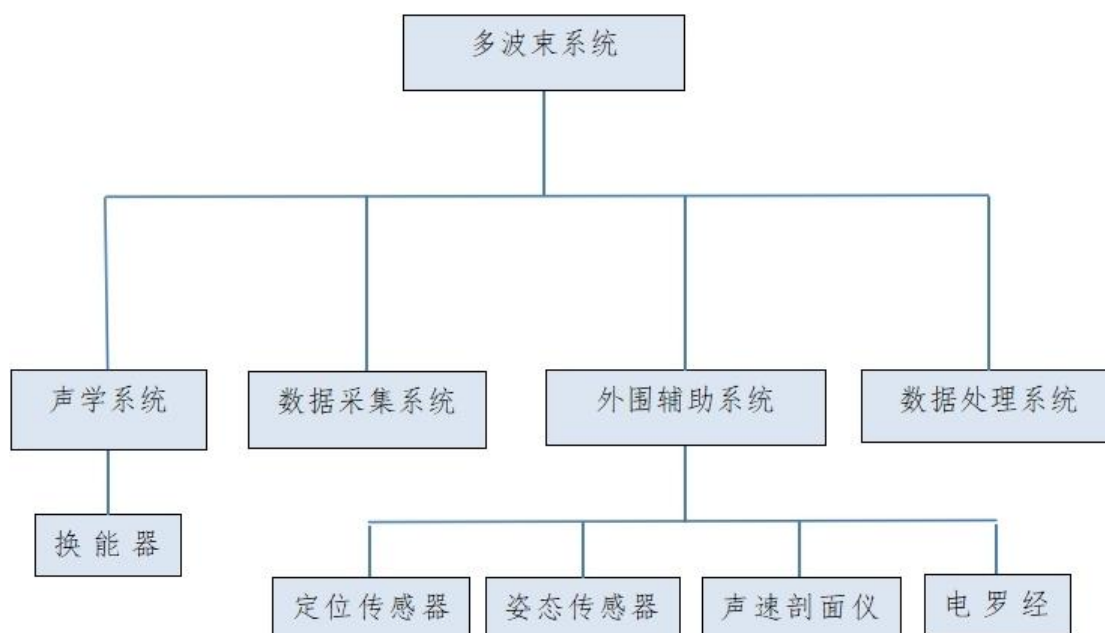


图 2-1 多波束声呐系统的组成

Figure 2-1 Composition of multi-beam sonar system

多波束声呐测深系统是一个综合集成系统，由各部分子系统组合而成，不同厂商公司生产的多波束系统在单元组成上会存在细微的不同，但总体上都包括声学系统、数据采集系统、外围辅助传感器和数据处理系统四个子系统。

（1）声学系统（MBES）

多波束的声学系统中最关键的地方是用于完成声能和电能之间相互转换的换能器，换能器主要负责波束信号的发射和接收。为了使发射出去的波束产生具有指向性，多波束声学系统的换能器基阵基本由多个基元排列成一条直线组成。发射换能器的作用是将电信号转换成声波信号发射出去，而接收换能器则是相反，接收到达海底并反射回来的声波信号并对其进行转换。

（2）数据采集系统（MCS）

多波束数据采集系统用于完成波束的形成，将接收到的声波信号转换为数字信号，并记录其往返时间，进而用往返时间反算出测量距离。数据采集系统通常包括负责操作底部波束传播和检测单元、数据处理工作站、数据存储器、实时声呐影像记录、导航记录信息和显示单元。

（3）外围辅助系统

外围设备主要包括定位传感器、声速剖面仪、姿态传感器、电罗经四个部分。定位传感器主要用于多波束测量的实时导航和定位；声速剖面仪监测不同海域声速的在空间上的变换，获取的声速剖面将用于后续对数据进行改正处理；姿态传感器也叫做姿态仪，主要负责采集测量船纵摇、横摇和涌浪参数的数据，用于反映实时的船体姿态变换，同时为后续数据处理进行姿态补偿，消除因船在海面上摇摆产生的误差。总之，所有的外围设备主要是要获取测量船的瞬时位置、姿态、航向等信息以及测定不同海域、不同深度的声速传播情况。

（4）数据处理系统

数据处理系统对其他系统测量得到的声波、定位、船体姿态、声速剖面、潮位等综合信息计算测量点的三维坐标，并生成海底平面地形图或者海底三维地形图，用于对海底开展勘测和研究工作。

2.2 多波束声呐测深系统工作原理(Working principle of multi-beam sonar bathymetry system)

多波束声呐测深系统具有两组在指向性上呈正交的换能器，分别用来发射和接收声呐波束，能够在同一时刻发射出具有一定角度扇面的多个波束信号，并且同步记录此扇面内所有测点的水深值。如图 2-2 所示，将换能器安装固定在船舷或者船底，发射基阵沿着测量船航向方向正下方发射扇面波束，波束在海水中传播到达海底后发生反射被接收基阵接收，接收后再由数据采集系统将声波信号转换成数字信号，并记录不同波束的往返时间、波束发射角度、海底散射强度等信息^[50]。

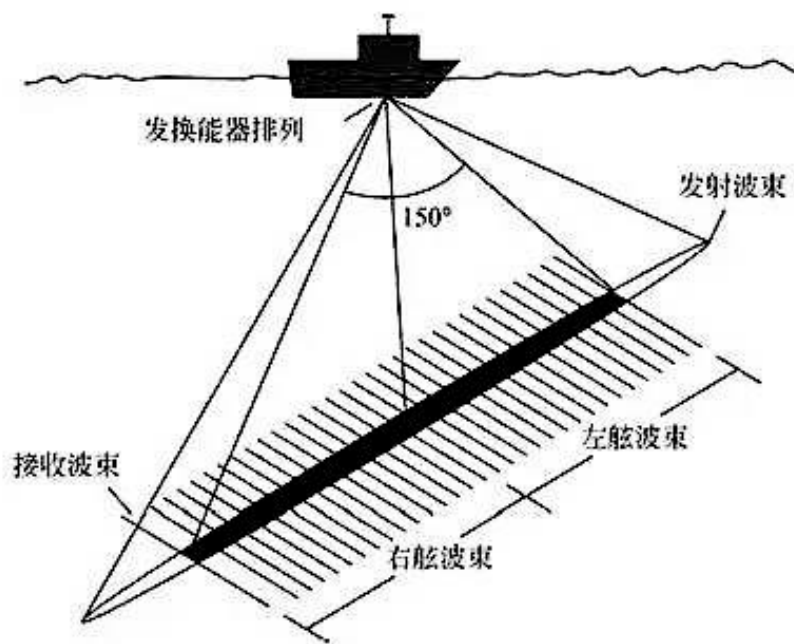


图 2-2 多波束声呐测深系统测量原理示意图

Figure 2-2 Schematic diagram of the operating principle of the multi-beam sonar sounding system

在每一次测量过程中，多波束声呐波束的发射和接收都会沿着测量船航向正下方形成条带式的测深剖面数据。由于多波束声呐测深系统是多个子系统组装而成，测量数据不仅取决传感器基阵，同时还受其他辅助设备影响。因此在数据处理时需要考虑换能器的吃水改正值和潮位改正值。多波束声呐系统测深点的水深值可近似为：

$$D = \frac{1}{2}ct \cdot \cos \theta + \Delta D_d + \Delta D_t \quad (2-1)$$

其中 θ 为波束入射角， ΔD_d 为吃水改正值， ΔD_t 为潮位改正值。

目前进行多波束测量的多波束测深系统种类繁多，市场上不同厂商在多波束系统产品性能上存在差异。本文采用的实验数据是由 Sonic2024 多波束声呐测深系统采集。Sonic2024 多波束声呐测深系统改进了前几代多波束测深系统庞大的声呐处理器和接口问题，将声呐处理器嵌入声呐头中，整个系统简单的由发射基阵、接收基阵和声呐接口组成，设备小巧轻便，快捷的安装方式方便了测量作业，其主要技术参数如表 2-1 所示。

Sonic2024 多波束声呐测深系统将换能器安装在测量船的船身，将 GPS 定位系统安装在换能器顶部用于进行实时跟踪定位。波束的定位是根据船体坐标系和地理坐标系之间的参数关系进行转换。多波束测深系统的船体参考坐标系是以声呐换能器安装杆和海面交点为原点，以航行方向为 X 轴正指向，以垂直向下为 Z 轴正指向，Y 轴指向船体侧向和 X、Z 轴构成右手正交坐标系。

表 2-1 Sonic2024 测深系统参数

Table 2-1 Sonic2024 sounding system parameters

名称	参数
工作频率/kHz	200~400
最大量程/m	500
波束个数	256
覆盖宽度/(°)	10~160
波束数目（每 ping）	256 个等角分布
覆盖宽深比	4~7 倍水深
量程分辨率/cm	1.25
波束大小/(°)	0.5×1
脉冲宽度	10 μ s~1ms
最大发射速率/Hz	75

通过系统参数，总体上可以看出 Sonic2024 多波束声呐测深系统具有宽覆盖测量扇面，最大测量宽度可达 160°；最大测量深度达到 500 米，更深的测量范围也有助完成更宽的测量覆盖面；1.25 cm 的高分辨率和 256 个等角分布的波束数量体现了测量的精细度。

2.3 多波束声呐数据解码（Decoding of multi-beam sonar data）

多波束声呐测深系统在测量过程中实时采集多种类型的数据，并以二进制的方式进行存储。现在市面上的多波束声呐测深系统品种很多，主要有美国 R2Sonic 公司的 Sonic 系列、丹麦 Kongsberg Simrad 公司的 EM 系列、还有 Seabeam 系列、RSeaBat 系列等多波束测量系统^[51]。不同厂商对测量数据的存储格式会有存在差异，因此，关于多波束数据的存储记录格式类型也有很多。目前主流的多波束数据记录格式有 ALL、XTF、UNB 等格式，不同格式之间可进行转换处理。本文所使用的数据存储文件格式是 XTF，在对原始数据文件进行解码之前，首先先了解分析 XTF 格式文件的数据结构，根据其数据结构再进一步完成解码。

2.3.1 XTF 格式数据结构

XTF 数据格式是目前通用的一种多波束声呐数据格式，具有复杂性、伸缩性和可扩展性等特点^[52]。XTF 数据格式在一个文件内存储不同的数据信息，其中包含声呐数据、导航数据、遥测数据、测深数据等多种类型的信息数据。

XTF 格式文件一般由文件头、各种数据包和数据组成，每个数据包前面都有对于数据

类型和数据大小的说明。数据包也叫做 ping，多波束测深数据主要有四种类型的数据包，分别是声呐、测深、姿态和注释四种数据包^[53]。XTF 文件从文件头开始记录，然后是数据包，根据数据包的标识信息可对数据包进行类型识别，跳过其他不需要的数据快速读取所需数据。文件头数据存储在 XTFFILHEADER 中，里面存储了数据的基础信息可用于判断通道信息，每个 XTFFILHEADER 包含六个通道空间。文件头包含文件信息和通道信息，通道信息则包含测深通道、声呐通道两部分信息^[54]。在数据结构上可将 XTF 数据格式看作树状结构，根节点是文件头，各种类型的数据包作为子节点，不同的数据包对应其相关数据^[55]。XTF 格式文件的结构如图 2-3 所示。

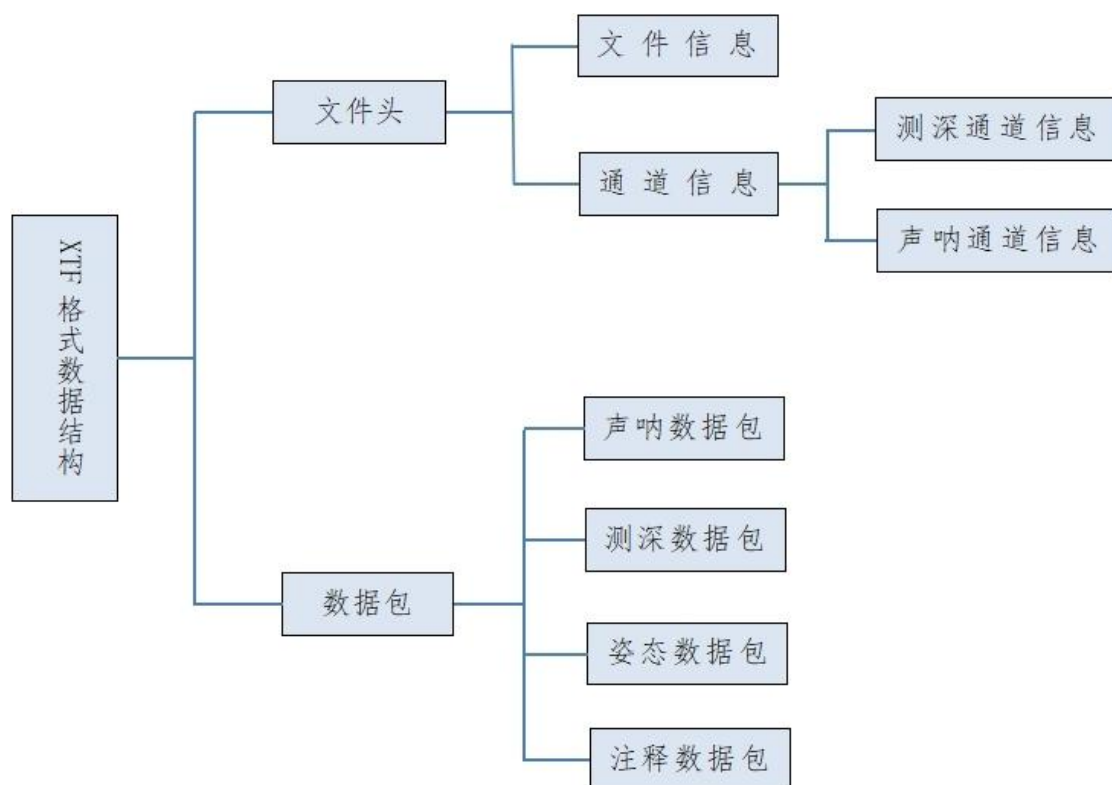


图 2-3 XTF 文件格式结构图

Figure 2-3 Structure diagram of XTF file

2.3.2 XTF 格式数据解码

XTF 格式的解码流程如图 2-4 所示。解码 XTF 文件的主要依据是数据结构，从 XTF 文件的文件头开始进行解码，首先先读取文件头信息以及文件头中的通道信息。XTF 文件头记录的大小为 1024 字节，所以在编程解码 XTF 文件时，要先从文件头读取 1024 字节，在读取完成之后通过判断该文件是否文件头的依据是 1024 字节，即要求判断的第一个字节必须等于 0X7B，转换成十进制就是 123。

读取文件头信息后，下一步读取文件头信息结构中的所有通道数。当通道数大于 6 时，需要对文件头再次读取 1024 字节，因为当文件中存储的通道数量大于 6 时，文件头记录

的大小以 1024 字节的增量增长，以便有充足的空间对所有通道结构进行存储。读取通道信息是至关重要的，这通道信息决定了之后的数据包文件中有几个数据通道。

读取数据包（Ping）时，编程通过使用一个循环运算读取每一个数据包的数据，循环结束的条件要求是读取的字节必须小于每一个数据包头结构的大小。读完每一个数据包的数据信息后，接着声明一个指针 `ptr` 指向数据缓冲区，这里的数据缓冲区只是一个声明，只有当数据包被指针 `ptr` 读取才具有真是数据。然后再声明一个与 XTF 格式数据包头结构类似的指针 `PingHeader` 指向指针 `ptr`，这样就可以通过指针 `ptr` 读取 `PingHeader` 中的所有数据。若想读取之后的数据，则对指针 `ptr` 进行 `ptr+=sizeof` 运算，将 `ptr` 指针位置向后移动一位指向下一个单元，以便继续读取下一个数据包通道结构。若遇到数据包为空数据的情况，直接 `return` 返回，然后读取下一个数据包，直到最后将指针 `ptr` 移动到文件头结尾，完成所有数据包的读取。根据 XTF 文件头的采样点个数乘以采样精度，就可以计算出采样数据的字节数，并进而读取采样数据。至此，可以继续读取下一个通道的数据，最终逐一将每一个 ping 数据都完全解编。

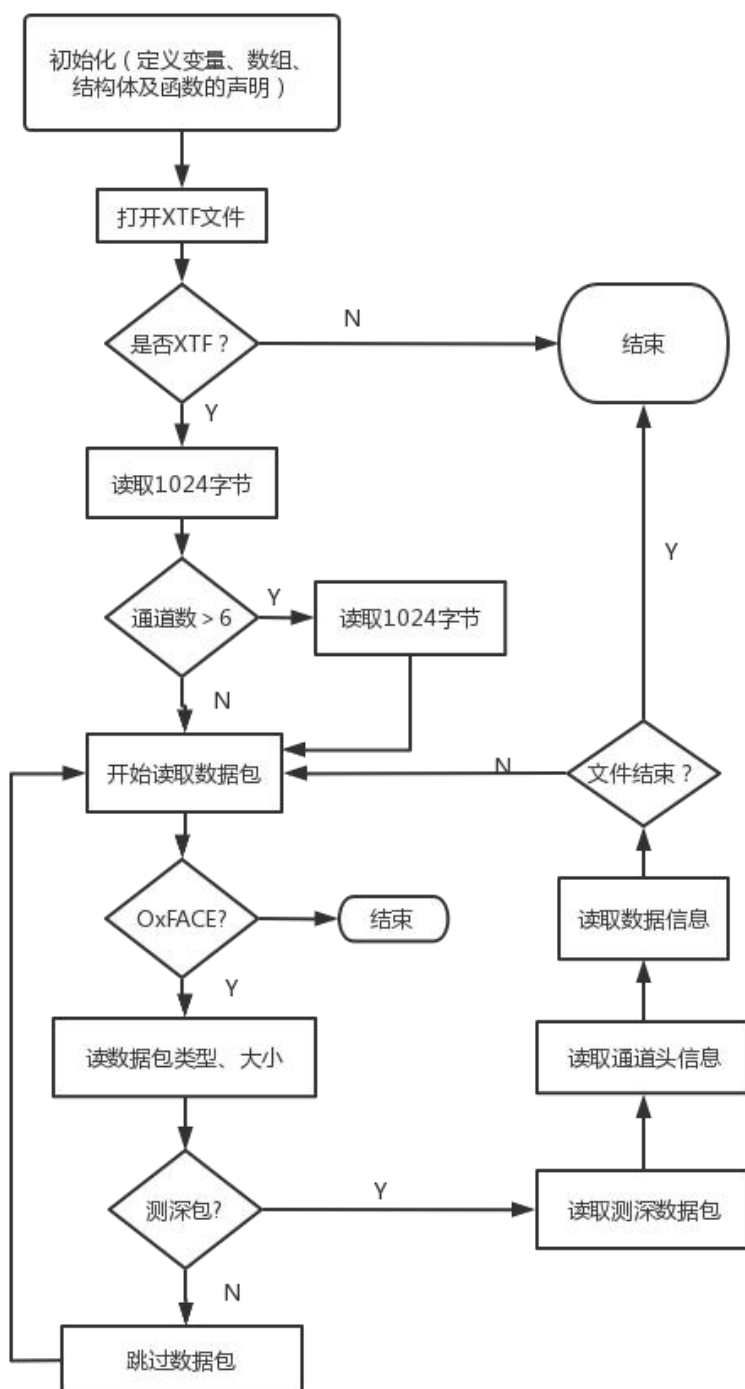


图 2-4 XTF 格式文件解码流程图
Figure 2-4 XTF file decoding flowchart

Triton 02-22-2022 06-46-45_From Data_2016-178_0017_0002.txt - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

Northing	Easting	Lat (CARIS DMS)	Lat (DMS)Long (DMS)	Depth (Proc)	Profile	Beam					
3386053.310	408645.662	030-36-12.774N	30	36	12.774	122	02	49.240	12.944	1	6
3386051.262	408645.364	030-36-12.708N	30	36	12.708	122	02	49.229	12.616	1	10
3386050.672	408645.282	030-36-12.689N	30	36	12.689	122	02	49.226	12.458	1	11
3386050.234	408645.229	030-36-12.674N	30	36	12.674	122	02	49.224	12.842	1	12
3386049.327	408645.101	030-36-12.645N	30	36	12.645	122	02	49.220	12.870	1	14
3386049.207	408645.078	030-36-12.641N	30	36	12.641	122	02	49.219	12.563	1	15
3386049.130	408645.072	030-36-12.639N	30	36	12.639	122	02	49.219	12.944	1	16
3386048.744	408645.019	030-36-12.626N	30	36	12.626	122	02	49.217	12.880	1	18
3386048.338	408644.961	030-36-12.613N	30	36	12.613	122	02	49.215	12.792	1	19
3386048.039	408644.920	030-36-12.603N	30	36	12.603	122	02	49.213	12.777	1	20
3386047.868	408644.896	030-36-12.598N	30	36	12.598	122	02	49.213	12.857	1	21
3386047.519	408644.844	030-36-12.586N	30	36	12.586	122	02	49.211	12.794	1	22
3386047.240	408644.803	030-36-12.577N	30	36	12.577	122	02	49.209	12.780	1	23
3386046.879	408644.750	030-36-12.565N	30	36	12.565	122	02	49.208	12.698	1	24
3386046.758	408644.738	030-36-12.561N	30	36	12.561	122	02	49.207	12.807	1	25
3386046.511	408644.703	030-36-12.553N	30	36	12.553	122	02	49.206	12.810	1	26
3386046.276	408644.668	030-36-12.546N	30	36	12.546	122	02	49.205	12.819	1	27
3386046.023	408644.633	030-36-12.537N	30	36	12.537	122	02	49.203	12.804	1	28
3386045.769	408644.598	030-36-12.529N	30	36	12.529	122	02	49.202	12.790	1	29
3386045.534	408644.563	030-36-12.522N	30	36	12.522	122	02	49.201	12.781	1	30
3386045.331	408644.534	030-36-12.515N	30	36	12.515	122	02	49.200	12.804	1	31
3386045.096	408644.505	030-36-12.507N	30	36	12.507	122	02	49.199	12.794	1	32
3386044.906	408644.476	030-36-12.501N	30	36	12.501	122	02	49.198	12.820	1	33
3386044.697	408644.446	030-36-12.494N	30	36	12.494	122	02	49.197	12.827	1	34
3386044.481	408644.417	030-36-12.487N	30	36	12.487	122	02	49.196	12.823	1	35
3386044.272	408644.388	030-36-12.481N	30	36	12.481	122	02	49.195	12.819	1	36
3386044.031	408644.353	030-36-12.473N	30	36	12.473	122	02	49.193	12.787	1	37
3386043.828	408644.324	030-36-12.466N	30	36	12.466	122	02	49.192	12.783	1	38
3386043.631	408644.300	030-36-12.460N	30	36	12.460	122	02	49.192	12.783	1	39
3386043.441	408644.271	030-36-12.454N	30	36	12.454	122	02	49.191	12.789	1	40
3386043.257	408644.247	030-36-12.448N	30	36	12.448	122	02	49.190	12.799	1	41
3386042.889	408644.195	030-36-12.436N	30	36	12.436	122	02	49.188	12.810	1	42
3386042.712	408644.171	030-36-12.430N	30	36	12.430	122	02	49.187	12.814	1	43
3386042.191	408644.096	030-36-12.413N	30	36	12.413	122	02	49.184	12.837	1	44

图 2-5 解码得到的水深数据

Figure 2-5 The water depth data of decoded

2.4 多波束声呐数据处理 (Multi-beam sonar data processing)

多波束测深系统测量获得的数据包括水深数据、位置数据、声速剖面数据、姿态数据等，其中用于进行海底三维地形构建的数据是水深数据，为获得高精度海底三维地形模型需要对原始数据进行消除误差的数据处理。

XTF 文件解码得到的数据是原始测量数据，多波束声呐测深系统在测量过程中，由于仪器和环境的影响，测量不可避免的会产生误差，导致存在噪声和虚假地形。因此，在利用水深数据进行海底三维地形建模前要消除噪声，对数据进行改正处理。多波束声呐数据的处理流程如下图所示。

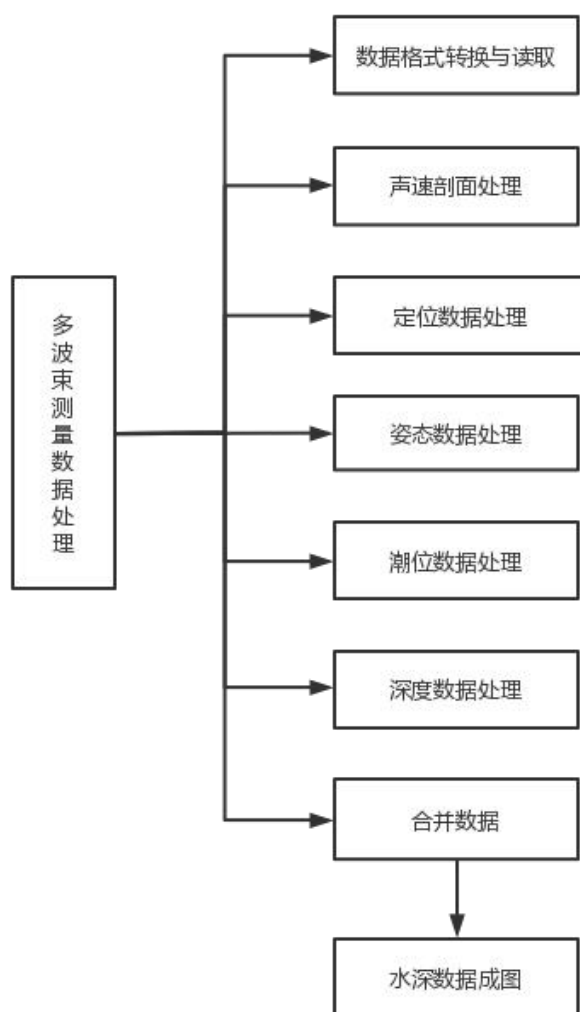


图 2-6 多波束声呐数据的处理流程图

Figure 2-6 Process flow chart of multi-beam sonar data

(1) 数据读取和格式转换。对原始多波束数据进行提取和转换，对不同的存储数据格式进行转换解码，对数据来源和特征文字进行说明等。

(2) 声速剖面处理。由于海水中存在各种介质，还有海水的温度、密度、盐度会发生改变，因此，多波束在海水中的传播速度是不断变化的。对于中间波束，可以把声线近似为直线传播，但对于超过 45° 宽度的边缘波束，声线传播并不是直线，而是发生了弯曲，为此，需要根据实际的情况选择声速剖面进行声线跟踪，重新计算测深值。一般声速随着海水深度而发生较大改变，因为考虑声速只在垂直层面上发生变化的声速模型称为声速垂直分层模型。在声速垂直分层模型中，声速剖面起决定性作用，测量船在航行过程中多波束声呐测深系统进行测量时，同时由声速剖面仪对测区进行声速的测量。在声速垂直分层模型中，声速遵循 Snell 定律如下：

$$\frac{\sin \theta_0}{c_0} = \frac{\sin \theta_i}{c_i} = \text{const} \quad (2-2)$$

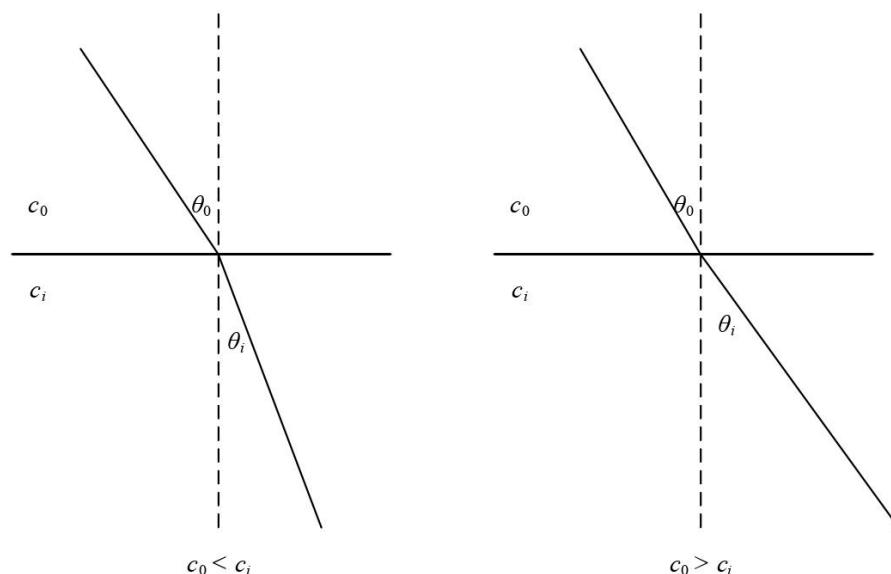


图 2-7 Snell 折射定律图

Figure 2-7 The diagram of Snell law

其中， c_0 、 c_i 分别为不同介质层的声速， θ_0 、 θ_i 分别为声速的入射角和出射角。根据 Snell 定律可以求出不同介质层面声速的实际传播速度，进而求出真实的水深值。

(3) 定位数据处理。定位数据的处理主要是对 GPS 跳点数据进行编辑，删除噪声点，包括删除在经度、纬度、航速、航向上的噪声点，对删除后时间间隔不一致的数据进行拟合内插得到时间间隔一致的数据，最终将测量船进行测量的航迹以一系列点的形式显示。

(4) 姿态数据处理。由于多波束声呐测深系统是安装在船上进行测量，测量过程中受到海面风流、海水流动等环境原因导致船体发生摇摆，多波束声呐测深系统在进行测量时与铅垂方向、航向间有夹角。因此，在进行数据处理时要考虑换能器的姿态并进行姿态改正。在对姿态数据进行处理时，首先要剔除姿态数据中的异常值，对删除后或原本缺失的点插值处理，然后在数据合并时加入影响旋转角的改正，对船姿引起的水深值误差进行补偿。

(5) 潮位数据处理。多波束声呐测深系统测量得到的水深值是换能器下的水深，必须通过潮位改正，将水深值转换为坐标系下的高程值。根据测深点的时间和空间，查找相应的潮位资料，对水深值进行转换处理得到高程值。

(6) 深度数据处理。深度数据是进行海底三维地形建模最重要的数据，深度数据的精度直接影响决定了后续海底三维地形模型的精度。对深度数据进行处理，要进行数据的编辑优化处理，剔除假信号和数据粗差，展开深度数据异常值的定位研究，得到误差较小的高质量数据为后续生成地形图做好准备。影响深度数据的因素主要有两个方面，一是仪器自身的精度问题和测量环境影响所造成的系统性误差，可通过系统改正来提高精度；二是测量过程中的随机误差，可通过数据滤波来消除，现有的数据滤波方法分为交互式滤波和自动滤波。

(7) 数据合并。数据合并是将水深点坐标从船体坐标系转为地理坐标和某一高程基准面下的高程。主要是将多波束声呐测深系统采集过程中所涉及到的姿态数据、声速数据、潮位数据、换能器吃水深度数据等参数归并到水深计算中，并在垂直方向和水平方向上分别做数据转换处理。在垂直方向根据潮位数据将水深值转换到深度基准面上的高程值，得到水深；在水平方向，根据罗经和 GPS 定位数据将水深点的平面位置由船坐标系转换到大地坐标系。

2.5 多波束声呐数据的特点 (Characteristics of multi-beam sonar data)

对原始数据进行解码和数据改正处理后得到多波束声呐数据的三维坐标数据 (x, y, z) ，其中 x 、 y 是地理坐标经度和纬度， z 是水深数据。因为多波束声呐测深系统采用高频率、全覆盖、大面积的测量方式，所以测量得到的多波束声呐数据具有离散性、海量性、高精度、高密度四个显著的特点。

(1) 离散性

多波束声呐数据呈离散、无规则、随机分布是因为多波束声呐测深系统在进行测量的过程中，换能器接收到非平坦的海底地形反射回来的信号，并且在航行的过程中测量船不可能完全保持匀速直行。因此，用多波束声呐测深系统测量无法获取具有固定间隔的数据网格。此外，多波束数据在进行数据预处理的过程中会进行数据修正计算，这也会造成多波束声呐数据呈离散分布。

(2) 海量性

多波束系统一个小时采集的水深点大约是 5×10^6 个，其文件存储空间大约占 140MB。而每次测量都是一个周期，以天来计算，因此在一定的时间内可以进行大量的测量得到巨大充足的多波束数据。

(3) 高精度

多波束系统是根据信号的发射和接收的间隔时间来计算水深的。相比于单波束垂直向下发射信号的测量方式，多波束以扇形发射信号，测量覆盖面积大并且具有高精度，这个特点对于精确定位海底建立海底地形图十分必要。

(4) 高密度

多波束系统测量呈扇形发射，每个扫描扇面所扫描的水深点超过一百个，而且多波束发射频率高，波束脚印之间的横向间距小，使得多波束声呐数据分布非常密集。本文实验中所采用的数据为上海洋山港海区的多波束声呐数据，每条测线得到的数据点数超过一百万，可以看出多波束声呐数据呈高密度分布。多波束声呐数据也由于数据点密这一特点，更精准的对海底进行测量，绘制的图也更详细。

2.6 本章小结 (Summary of this chapter)

本章从基础原理出发，介绍组成多波束声呐测深系统的四个子系统，认识各个子系统

分别负责的工作部分，从而了解多波束声呐测深系统是如何对海底水深进行测量，以本文所用的 Sonic2024 多波束系统为例简单介绍测量时各个参数的情况。分析 XTF 文件的结构，进行原始数据的解码将存储的二进制格式数据转换为具有坐标的水深数据。最后简述了多波束声呐数据处理步骤和多波束声呐数据的四个特点。

3 海底地形建模技术的研究

3 Research on the Modeling Technology of Seabed Terrain

本章从常用的基于规则格网的反距离加权、克里金插值、自然邻点插值、Delaunay 三角网建模几种数字高程模型构建方法出发, 结合多波束声呐数据的特点, 寻求一种能够可靠高效的实现海底地形三维建模的算法。

3.1 数字高程模型 (Digital Elevation Model)

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 是一种通过对地形表面进行测量获取得到一定的离散数据, 并对测量结果数据按照特定的算法生成地形的数字化表达形式, 数字高程模型反映的是地形在空间上的分布特征。

根据采样点的坐标 X , Y 以及高程 Z 对地形进行建模得到数字高程模型, 用数字形式可描述为:

$$D_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3-1)$$

其中, X_i , Y_i 分别表示第 i 个采样点的横坐标、纵坐标, Z_i 表示采样点 (X_i, Y_i) 所对应的高程值。

根据图形的方式可将数字高程模型分为点、线、面三种表示方法。点形式是对离散点进行内插算法构建数字高程模型, 目前常见的基于点建模方法有规则格网和不规则三角网两种构建方法。线形式是通过对等高线、剖面线等构建数字高程模型。面形式则是将遥感影像图、透视图等作为纹理数据映射生成数字高程模型, 这样得到的地形三维模型图具有真实感^[56]。

规则格网建模方法在计算处理上简单, 但无法精准的表达地形的细节变化, 当格网大小不发生改变时, 规则格网构建的地形模型对复杂的地形现象难以作出很好的表达。不规则三角网建模方法在构网计算上难度复杂, 但由于直接利用离散数据点作为三角网的顶点进行构网, 能够较好的表达起伏变化明显的地形。在同样的地形表现效果要求下, 规则格网建模所需的点数量大于不规则三角网建模^[57]。

表 3-1 规则格网与不规则格网的对比

Table 3-1 Comparison of regular and irregular grids

	基于规则格网 DEM	基于不规则三角网 DEM
数据量	取决于网格间距（间距越小，数据量越大）	存储量大
计算难度	简单	复杂
数据来源	离散点内插	离散点构网
建模效率	较高	高
适用范围	平缓地形	起伏变化大地形

3.2 基于规则格网插值方法（Interpolation method based on regular grid）

规则格网建模的原理就是将区域空间划分为若干个大小相同的网格单元，每个网格单元对应一个离散点数值，无数值的单元网格由离散点数值经过内插算法计算得出数值。在海底地形构建中，主要常用的插值算法有反距离加权插值算法、克里金插值算法、自然邻点插值算法，以下对这三种进行规则格网的插值算法作简要分析。

3.2.1 反距离加权插值

反距离加权插值算法又称为 IDW 算法，此算法认为每个采样点的数值对插值点都有影响，其影响受采样点和被插值点之间的距离决定，每个采样点都有具有不同的权重^[58]。采样点和被插值点相距的距离越近则权重越高，反之，距离越远则影响越小，权重越低。当采样点和被插值点之间的距离超过规定范围时，该采样点对被插值点不产生影响，即没有权重。反距离加权插值算法本质上是一种加权平均算法，就是先确定各个采样点对插值点的权重，再乘以采样点本身数值并求和得到总值，得到的总值再除以所有采样点权重总和即可求出插值点的数值^[59]。

设在海区分布的一系列离散数据点的平面坐标和水深值为 X_i, Y_i, Z_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)， $P(X, Y)$ 是待求插值点， Z_p 是待求插值点的水深值，对范围内离散数据点的水深值做反距离加权插值得出 P 点的水深值，计算公式如下式所示：

$$Z_p = \begin{cases} \sum_{i=1}^n W_i Z_i / \sum_{i=1}^n W_i & W_i \neq 0 \\ Z_i & W_i = 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

其中， n 表示离散水深点的个数， W_i 表示离散水深点所占的权重， Z_i 表示第 i 个离散水深

点的高程值。

离散水深点的权重 W_i 与离散点和插值点之间的方向和距离有关，计算权重的公式如下式所示：

$$W_i = \frac{1}{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad (3-3)$$

3.2.2 克里金插值

克里金插值算法是通过变异函数，以无偏性条件和最小方差条件两个条件前提对区域内采样点进行取值计算插值点的数值^[60]。由于克里金插值算法充分考虑了采样点内部的空间关系，因此具有偏差最小的优点，是一种最优估计的内插算法。若假设区域变量 $f(x)$ 满足二阶平稳假设，那么待插点 p 可表示为：

$$f(x_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i) \quad (3-4)$$

其中 $f(x_i)$ 表示第 i 个采样点的函数值， λ_i 表示第 i 个点的权系数。根据无偏性条件得出：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3-5)$$

再根据最小方差条件得：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_j - x_i) + \mu = \gamma(x_p - x_i) \quad (3-6)$$

其中 μ 表示拉格朗日算子， $\gamma(x_j - x_i)$ 表示采样点之间的变异函数值， $\gamma(x_p - x_i)$ 表示采样点与待插点之间的变异函数值。

变异函数是克里金插值算法的重要基础。一个区域变量的空间变异性是指这个变量在空间中随着位置的不同而发生变化，因此确定变异函数就是对空间变异性进行分析。通过自身的结构和参数的不同，变异函数可以从不同方面反映空间变异性^[61]。

3.2.3 自然邻点插值

自然邻点插值算法是基于空间自相关性原理，即空间上越相似的事物距离就越接近，将点的数值代入这一原理，即在空间上距离越近的点在同一参数的数值会越接近。自然邻点插值的步骤是先对所有采样点创建初始泰森多边形，然后在对未知点进行插值运算时，改变初始泰森多边形同时对未知点生成一个新的泰森多边形，与未知点生成的新泰森多边形相交的所有泰森多边形中所有的采样点均被用来参与未知点的插值运算，而采样点对插值点的权重是由采样点所处的泰森多边形与待插点新生成的泰森多边形相交面积与采样点自身所处泰森多边形面积的比值决定。其公式如下：

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) f(x_i) \quad (3-7)$$

其中 $f(x)$ 是待插点的函数值, $w_i(x)$ 表示参与插值的采样点 x_i 关于待插点 x 的权重系数, $f(x_i)$ 表示采样点 x_i 的值。

权重系数是由采样点和待插点之间的空间尺度关系决定的。当把待插点 x 加入已生成的泰森多边形会得到一个与待插点相对应的新泰森多边形^[62]。其公式如下:

$$w_i(x) = \frac{T_i \cap T(x)}{T(x)} \quad 0 \leq w_i(x) \leq 1 \quad (3-8)$$

其中, T_i 表示采样点所处的泰森多边形的面积大小, $T(x)$ 表示待插值点 x 所处的泰森多边形的面积大小, $T_i \cap T(x)$ 表示两个参与计算的泰森多边形相交的面积大小。

3.3 基于不规则格网方法 (method based on irregular grid)

对于不规则格网建模可以通过建立各种不同网状用以生成数字模型, 例如三角网、四边形网或者多边形网^[63]。其中最简单、最可靠且运用最多的网状是三角网。所谓不规则三角网就是运用对不规则离散分布的数据点构建形成具有连续性、不重叠、不相交的三角形来无限逼近地形表面。在构建不规则三角网时, 三角面的形状和大小主要取决于不规则分布的离散数据点、三角形三个点的分布位置和三角形的密度情况。在众多三角网中, Delaunay 三角网由于构网的特征, 保证了所生成的三角形无限接近等边三角形, 使得构建的三角网更准确、可靠和适用。因此, 目前在三角网的构网方面 Delaunay 三角网应用最广泛^[64]。

在存储方式上, 基于不规则三角网构建的数字高程模型比规则格网构建的数字高程模型更为复杂。不规则三角网不仅要存储三角形每个点的深度值, 还要存储每个点的平面坐标、以及三角形点、边的拓扑关系。拓扑结构决定不规则三角网 DEM 的复杂性, 因此拓扑关系对不规则三角网的构网至关重要。三角形是不规则三角网建模最基本的结构单元, 也是最重要的影响因素, 三角形的形状深深影响着建模的质量。因此, 在进行不规则三角网构网时要求所生成的三角形满足以下特征:

- (1) 唯一性, 即不论从何点开始构网, 最终得到的构网结果都是一样的、相同的;
- (2) 在构成三角网中, 每个三角形都必须尽可能的接近等边三角形;
- (3) 构网要用最邻近的点构成三角形, 三角形的边长之和要求最小。

确保三角网唯一性有以下三条准则:

- (1) 空外接圆准则: 经过每个三角形的外接圆不允许包含其他的数据点;
- (2) 最大的最小角准则: 由两个相邻的三角形构成的四边形的对角线的最小内角必须小于这两个三角形的最小内角, 这个要求也使得所构三角网中的三角形必须接近等边三角形;

(3) 张角最大准则：点止基线的张角为最大值。

3.3.1 Delaunay 三角网

Delaunay 三角网与 Voronoi 图互为偶图。有公共边的 Voronoi 多边形称为相邻 Voronoi 多边形，将连接三个相邻的 Voronoi 多边形的共同顶点作为 Delaunay 三角形外接圆的圆心^[65]。连接所有相邻 Voronoi 多边形的中心点所形成的三角网即 Delaunay 三角网^[66]。

平面 Voronoi 图是用一组直线将研究区域内的离散点连接成 k 个互相邻接的多边形，且满足：

- (1) 每个多边形内只包含一个离散点；
- (2) 包含离散点 (x_i, y_i) 的多边形内任意一点 (x, y) 满足下式：

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (x-x_j)^2} < \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_i)^2} \quad (i \neq j) \quad (3-9)$$

- (3) 若任意一点 (x, y) 在点 (x_i, y_i) 和点 (x_j, y_j) 所在多边形的公共边上，满足下式：

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (x-x_j)^2} = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_i)^2} \quad (i \neq j) \quad (3-10)$$

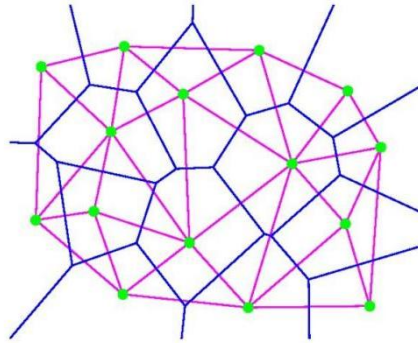


图 3-1 蓝色线为 Voronoi 多边形 紫色线为 Delaunay 三角网

Figure 3-1 The blue line is the Voronoi polygon and the purple line is the Delaunay triangulation

由于 Delaunay 三角网同时具有空外接圆和最大的最小角两个性质，从此性质上讲，Delaunay 三角网是最接近规则化的三角网。因此，Delaunay 三角网也被认为是平面三角网中最佳的三角网。用于生成 Delaunay 三角网的三种主要算法分别是三角网生长算法、逐点插入算法、分治算法。

3.3.2 三角网生长算法

三角生长算法的构网步骤是从数据中随机取一点，然后查找与此点相距最近的另一个点，将其连接得到一条初始基线，在初始基线的右边按照 Delaunay 三角网的构网性质继续查找第三点构成一个三角形，接着将三角形的两条新边（基线起始点与第三点的连线、基线终止点与第三点的连线）作为新基线不断扩展新三角形，直至所有离散数据点均历遍查找完成构网。

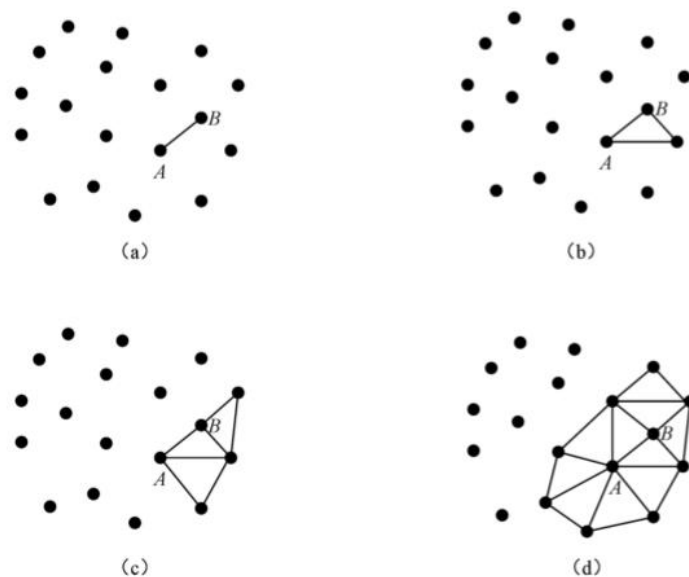


图 3-2 三角网生长算法过程

Figure 3-2 Triangulation network growth algorithm process

由于三角网生长算法第一步需要对点进行搜索，搜索意味着需要花费一定的时间，为解决这一问题，邓曙光等人提出了用正负区原理来对三角网生长算法进行改进^[67]。如图 3-2 所示。根据由 $t_1[k]$ 和 $t_2[k]$ 的直线方程式进行判别，将点坐标带入方程 $F(x, y) = y - Ax - B$ ，若 $F(x, y) > 0$ ，判别点位于正区，若 $F(x, y) < 0$ 则判定点位于负区。只有当点与 $t_3[k]$ 位于不同区才能成为与之相连的扩展点。通过这种正负区方法，缩小了搜索点的范围。

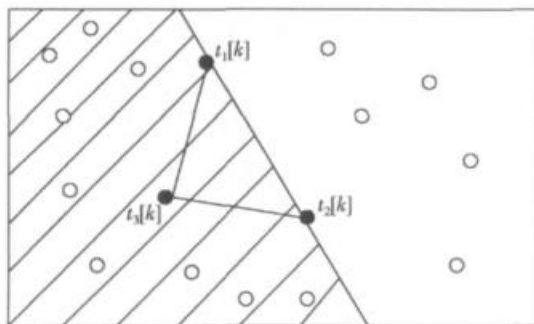


图 3-3 利用正负区搜索点

Figure 3-3 Using the positive and negative areas to search for points

3.3.3 逐点插入算法

逐点插入算法顾名思义在已确定的三角网中插入一个新的点，插入的点与原三角形的三条边重新构成三个三角形。该算法的基本步骤是先确定一个包含所有离散数据点的起始三角形，再将离散数据点依次插入，在三角形链表中寻找影响插入点的三角形的外接圆，并剔除两条影响三角形的公共边，将插入点和影响三角形的全部顶点连接形成新的三角形，同时要依据 Delaunay 三角网的准则对新形成的三角形进行优化。逐点插入算法运算简单，

数据处理时所占用的内存小，但处理速度较慢。

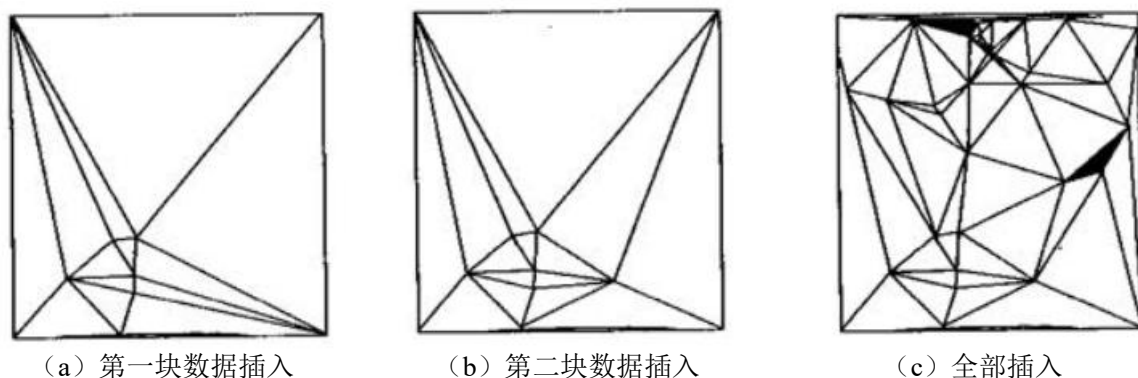


图 3-4 逐点插入算法过程

Figure 3-4 Point-by-point insertion algorithm process

对于在三角网中插入点重新构造三角网的做法是将插入点连接所在三角形的三个顶点，在形成新的三角形之后对三角形的边进行删除优化处理。但是这种方法每插入一个点，则该点所在三角形必须重新构建，受之影响，该点附近的三角形也需重新构建。于是，Rebay 提出了先将插入点插入在边界上，后再逐点插入区域内^[68]。后来，郭吉名等人为了优化边界点插入的过程，提出了先将点按相邻排列，再分级插入的办法进行优化改进^[69]。

3.3.4 分治算法

分治算法首先依据离散数据点的坐标对点集进行排序，随后将完成排序的离散数据点集以递归方式进行分割，直至分割子集中包含的点数数量足够少，以便快速简单的进行 Delaunay 三角构网，最后由最小子集逐级由下向上合并所有相邻子集最终生成三角网。分治算法由于对数据点进行分割处理，分割后的点集构网速度快。

在进行分治算法时必须处理的两个问题，一是如何对数据点集进行分割，二是如何使合并生成的三角网满足 Delaunay 三角网的准则。针对第一个问题，胡金星等人提出了一种 Delaunay 三角剖分办法，先是根据 x 方向进行分割，再根据 y 方向进行分割，然后再按照 x 方向、y 方向对点集进行排序，此办法可以有效的避免点分割时出现点分布不均匀现象^[70]。对于子三角网合并成最终三角网的过程中，出现不符合 Delaunay 三角网准则的三角网可对之进行删除。

3.4 Delaunay 三角网的合成算法 (Synthesis Algorithm of Delaunay Triangulation)

三角网生长算法虽然在计算上运行简便，但需要耗费大量的时间，随着各大研究学者不断提出新的改进算法，渐渐的对三角网生长算法的运用越来越少了。逐点插入算法和分治算法各具优势又有局限，逐点插入算法运算简单，运行时占用内存空间小，但效率低下，同时生成的三角网存在无法满足 Delaunay 三角网准则的问题。分治算法通过分割再合并，大大的减少了运算时间，提高了效率，但运行时占用内存空间极大。

由于逐点插入算法和分治算法两种算法在运行效率和运行时对计算机内存性能的优劣具有互补性。因此，提出一种基于逐点插入算法和分治算法的合成算法，考虑将两种算法结合起来，对它们进行一个互补再优化，从而实现提高算法的性能和速度，更好的进行 Delaunay 三角网构网。合成算法的基本思路是先对离散数据点集按照分治算法进行分割，将大的点集按照递归方式分割成一定小的子集，在子集中运用逐点插入算法，实现子集三角网的生成，再对子集进行合并最终完成三角网的生成。合并算法的思路图如下图所示，其中 V 表示数据点集， N 表示 V 中数据点的数量， d 表示分割阈值。

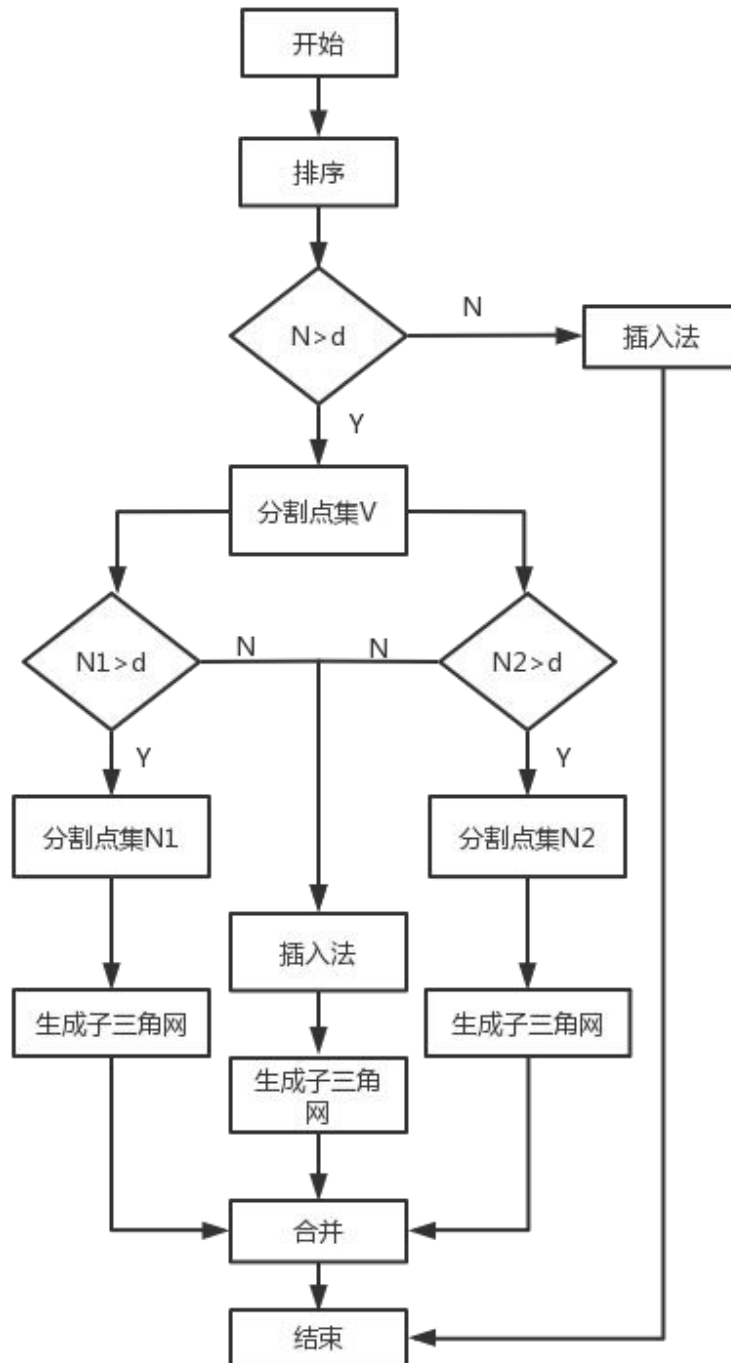


图 3-5 合成算法思路图

Figure 3-5 Synthesis algorithm idea diagram

合成算法的基本步骤如下：

(1) 按照分治算法的思路对数据点集进行分割。把数据点集中的点以先横坐标再纵坐标进行排序，再将完成排序的点集按照阈值进行分割，分割成两个近似相等的子集。

(2) 对于逐点插入使用的是凸壳算法，将点集内每个点按照 x 坐标的最大值、最小值进行提取，同理也对 y 坐标进行最大值和最小值的提取，将提取的点连接作为初始凸壳，再按照递归函数 $convex(I, J)$ 把剩下的点找出加入凸壳链表完成整个凸壳。以 x 坐标或者 y 坐标最小的点读入凸壳点集，把最小点与随后找到的两个凸壳点相连形成初始三角形，再不断的连接最小点和随后找到的其他凸壳点生成新的三角形，初步实现三角网的生成。

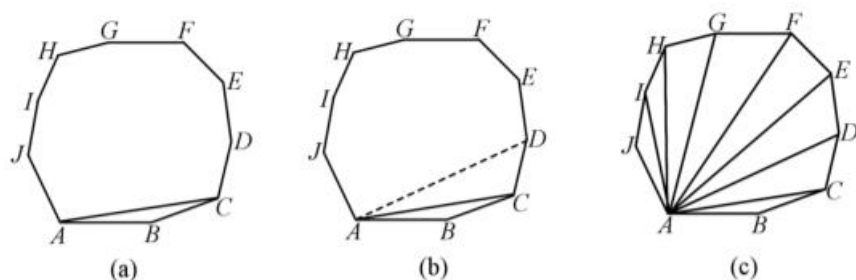


图 3-6 初始三角网的生成过程

Figure 3-6 The generation process of the initial triangulation

(3) 得到初始三角网后，根据逐点插入算法，将凸包内的点依次插入初始三角网，在初始三角网的基础上生成新的三角网。为了保证插入点生成新的三角形符合 Delaunay 三角网准则，在进行插入运算的同时必须用 LOP 对三角网进行优化处理，以确保生成的三角网符合 Delaunay 三角网的特性。如果所生成的三角形不满足 Delaunay 三角网的特性，则对相邻的两个三角形所组成的四边形中的对角线进行调换。设三角形的三个顶点为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ ，插入点为 $D(x_4, y_4)$ ，三角形外心即外接圆圆心为 $R(x, y)$ ，满足下列公式：

$$x = \frac{(y_2 - y_1)(y_3^2 - y_1^2 + x_3^2 - x_1^2) - (y_3 - y_1)(y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)}{2[(x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)]} \quad (3-11)$$

$$y = \frac{(x_2 - x_1)(x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2) - (x_3 - x_1)(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)}{2[(y_3 - y_1)(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1)]} \quad (3-12)$$

(4) 最后合并子三角网。首先寻找子三角网的底线，在两个子三角网 T_1 、 T_2 中找到能与底线相连接构成 Delaunay 三角网的第三点。连接两个子三角网的边成为新的底线，不断迭代直至顶线结束三角网的合并。

3.5 本章小结 (Summary of this chapter)

本章对数字地形模型的构建方法进行了阐述，归纳总结了反距离加权插值、克里金插

值、自然邻点插值三种规则格网插值算法和生长算法、逐点插入算法、分治算法三种生成 Delaunay 三角网的方法的相关理论知识和算法，对其进行分析讨论。针对逐点插入算法和分治算法的利弊提出一种基于两种算法的改进算法。

4 海底三维地形建模

4 three dimensional modeling of seabed topography

海底三维地形建模与陆地不同的是，在测量时由于存在海水面多方面因素的影响，测量得到的数据呈不规则离散分布，且海底地形地势变化剧烈，对于建模要求更高。本章主要采用规则格网和不规则三角网对海底地形进行建模。由于规则格网建立的地形模型要求原始数据的数据量小，且生成的地形不够精细，不能较好的表达地形起伏，因此最终选用 Delaunay 三角网来进行完整的海底地形三维建模。

4.1 基于规则格网进行建模（Modeling based on a regular grid）

本文实验数据来源于 Sonic 2024 多波束声呐测深系统在上海市洋山港所采集的数据，通过对采集得到的原始数据进行解析与处理，得到水深数据 (x,y,z) ，其中 x 、 y 代表测量点的经度和纬度坐标信息， z 代表的是测量数据点的水深值。测量区域经度纬度分别为 $122^{\circ}08'7.22''$ ， $30^{\circ}62'7.74''$ ，水深值在 12m 到 17m 之间。由于考虑到多波束声呐数据的海量性，规则格网建模在计算时所耗时间较长，因此选取其中一条测带作为规则格网建模的数据，用以说明不同规则格网的插值方法在建模时间、建模效果上的区别。

进行规则格网插值时，可对网格间距进行设定，但设定值不可过大或过小，若网格间距太大，则不能精确的表达地形起伏，若网格间距太小，可能发生网格格点附近无水深值，进行插值时发生误差。考虑实验数据的分布情况，进行规则格网插值时网格间距设定为 0.5m，网格大小为 13 行 \times 100 列，网格点数为 1300 个。

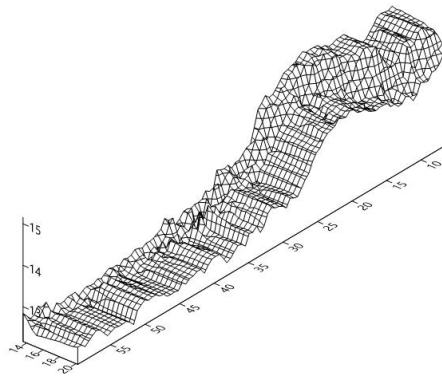


图 4-1 反距离加权插值法

Figure 4-1 Inverse distance weighted interpolation method

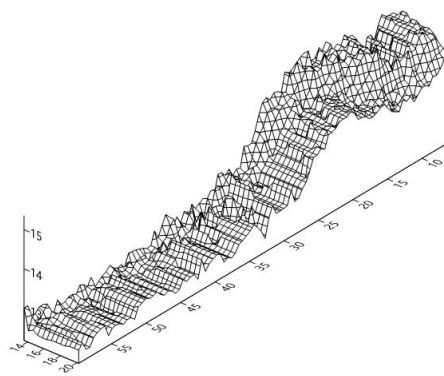


图 4-2 自然邻点插值法

Figure 4-2 Natural neighbor interpolation method

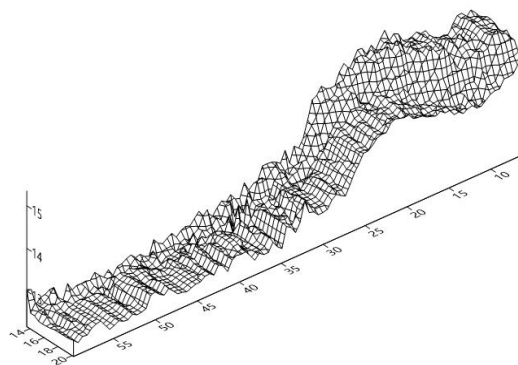


图 4-3 克里金插值法

Figure 4-3 Kriging Interpolation Method

图 4-1、图 4-2、图 4-3 分边是通过反距离加权插值、自然邻点插值、克里金插值三种不同的插值方法进行的规格格网建模，从图中可以看出，自然邻点插值和克里金插值两种插值方法构建的海底地形三维模型图表现不是很好，自然邻点插值和克里金插值的结果对地形边界进行了拉伸。在建模效果上，反距离加权插值方法的效果较好。在建模时间上，反距离加权插值所经历的时间最短，是 3.04 秒，自然邻点插值经历时间最长，是 75.1 秒，克里金插值经历的时间是 3.68 秒，与反距离加权插值相差不远。

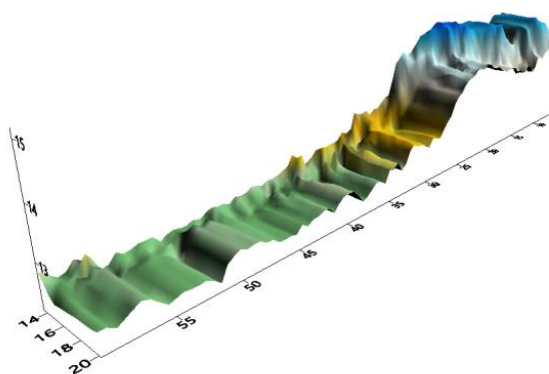


图 4-4 基于反距离加权插值水深地形图

Figure 4-4 Bathymetric topographic map based on inverse distance weighted interpolation

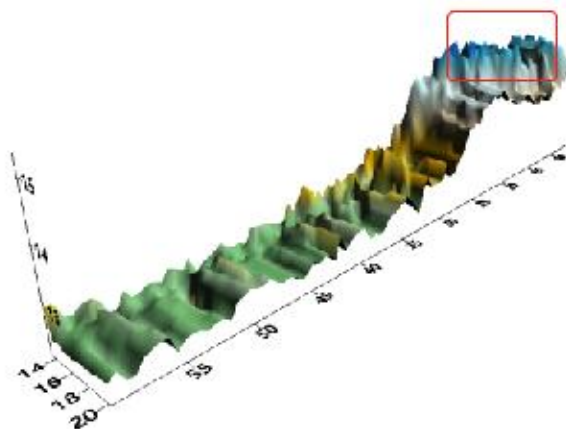


图 4-5 基于自然邻点插值水深地形图

Figure 4-5 Bathymetric topographic map based on natural neighbors

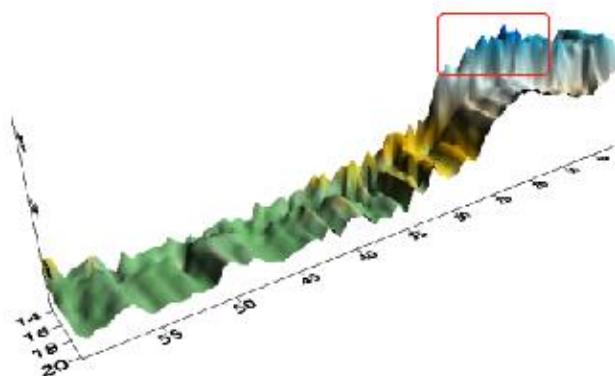


图 4-6 基于克里金插值水深地形图

Figure 4-6 Bathymetric topographic map based on kriging interpolation

4.2 精度评估 (Accuracy assessment)

对规则格网建模插值结果进行精度分析, 本文采取的是对点的中误差进行精度评价, 中误差的计算公式如下^[71]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - D_i)^2}{n}} \quad (4-1)$$

其中, D_i 表示检验点的水深值, R_i 表示插值点的水深值, n 表示将对 n 个检验点进行检查。

表 4-1 三种插值的中误差值

Table 4-1 Median error values of three interpolations

	反距离加权插值	自然邻点插值	克里金插值
σ	0.0248	0.0251	0.0247

根据中误差指标, 三种插值算法的精度从高到低为反距离加权插值、克里金插值、自然邻点插值。

反距离加权插值算法受权重的幂指数影响, 在插值过程中, 反距离加权插值算法会在区域内进行搜索, 对搜索的采样点给出不同的幂指数, 幂指数越大, 说明其影响插值算法程度越大, 距离插值点越近。在平缓地形区域内, 各点值变化较小, 此时幂指数即使不同, 对插值结果的影响也不会很大, 若在地势起伏变化明显的区域, 幂指数对插值的影响逐渐加深。所以, 反距离加权插值要求采样点数据量大, 点分布密集, 而这正符合多波束声呐数据的一大特性, 因此, 采用反距离加权插值得到的效果最好。

自然邻点插值算法依据的是附近采样区域内其他邻点, 实际上自然邻点插值算法是局部插值, 对于地形复杂、变化情况剧烈的区域, 生成的地形模型会出现一定程度的失真, 不能较好的实现地形模型的构建, 且在建模的速度上, 自然邻点插值是较慢。

克里金插值算法因为在计算上要求考虑无偏估计和最小方差两个条件, 相比反距离加权插值和自然邻点插值算法较为复杂, 并且在插值时会生成负值, 无法实现地形起伏变化的一个光滑。对多波束声呐数据进行海底三维地形建模分范围宽广, 地形起伏变化大, 由此可见, 克里金插值算法不适合用来进行大规模的海底三维地形模型的构建。

4.3 基于 Delaunay 三角网合成算法进行建模 (Modeling Based on Delaunay Triangulation Algorithm)

基于规则格网建立的海底三维地形模型计算量小, 拓扑关系简单, 在地形局部细节上表现得不是很好, 拉伸了边界。规则格网建模要对深度数据进行内插处理, 使离散点变成规则栅格分布, 这一处理不可避免的会损失地形的原始信息。因此, 基于规则格网建模适合于测量点分布均匀的数据, 否则生成的三维地形模型会产生一定的误差。而 Delaunay 三角网建模则克服了这个缺点, Delaunay 三角网是直接使用离散数据点作为三角形顶点进行

构网，能够较好的表达起伏变化明显的地形。

多波束声呐数据具有离散性、海量性、高精度、高分辨率的特点，能够满足大比例尺海底三维地形模型构建的需求。但也因多波束声呐数据呈离散不规则分布，数据量巨大且复杂，使用一般的建模技术进行建模的效果不会太好。本文针对多波束声呐数据的特点，在考虑计算机运行和效率的前提下，使用一种改进的合成算法，分别对所获得的五条多波束声呐条带数据进行 Delaunay 三角网的构建。如下图 4-5 所示，多波束声呐数据点分布非常密集紧凑，因此，一条多波束声呐条带生成的三角网也非常之密集，三角形分布越密集，生成的地形模型越详细。



图 4-7 原始水深图

Figure 4-7 Original water depth map



图 4-8 生成 Delaunay 三角网（局部）

Figure 4-8 Generate Delaunay triangulation (partial)

表 4-1 传统逐点插入算法与合成算法的构网时间

Table 4-1 Comparison of regular and irregular grids

离散点数	三角形数	传统逐点插入算法 构网时间/秒	合成算法构网时间 /秒
2000	3963	3.125	1.016
5000	9950	18.375	6.104
10000	19950	114.610	38.022
15000	27347	172.142	58.386
20000	38379	275.861	87.919

通过对不同数量的离散数据点进行三角网构网，从表 4-1 可以看出，传统逐点插入算法在构网的时间上所耗费的时间较长，且随着点数的不断增加，时间呈指数增长。合成算法由于在进行三角网构网前对数据点集进行了分块处理，在时间上相比传统逐点插入算法大大缩短了。通过对离散点进行三角网构网所花费的时间，可以看出改进的合成算法在时间上远远小于传统的逐点插入算法，这大大提高了三角网构网的速度。

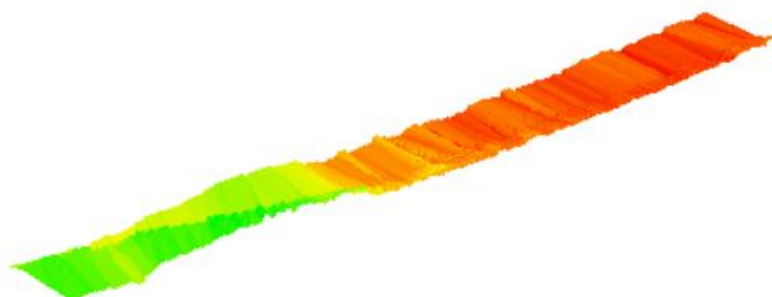


图 4-9 传统逐点插入算法生成地形图

Figure 4-9 Traditional point-by-point interpolation algorithm to generate terrain map



图 4-10 改进合成算法生成地形图

Figure 4-10 Improved synthesis algorithm to generate terrain map

基于传统逐点插入算法和改进的合成算法分别对多波束声呐数据构建了海底三维地形模型，如图 4-9、4-10 所示，传统逐点插入算法构建的海底三维地形模型在局部地形细节上表现得不是很好。相比较而言，改进的合成算法对地形的细节表现得更加精确。

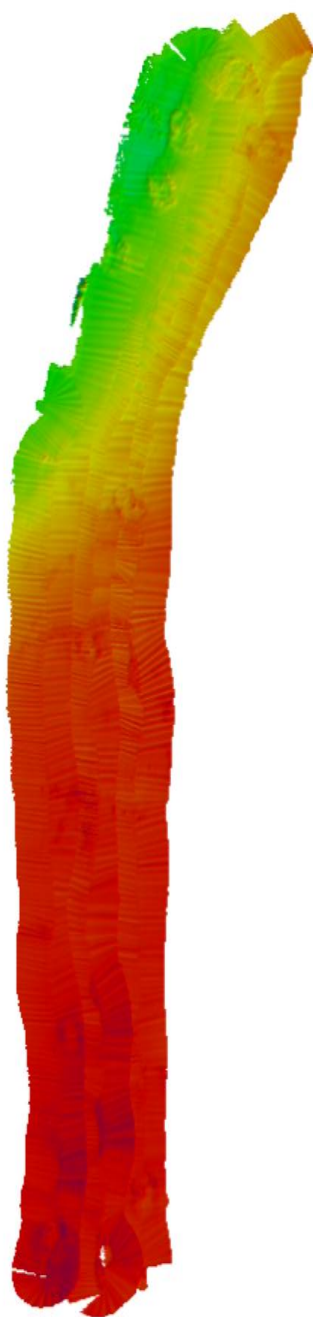


图 4-11 海底地形图

Figure 4-11 seabed topographic map

利用 Delaunay 三角网构网生成得到单条地形图，利用坐标点的定位信息按照位置关系合并所有条带最终形成完整测量区域的海底地形图。再根据水深的深浅对地形进行了不同颜色的可视化表达，如图 4-11 所示，水深分布从浅到深按绿色-黄色-红色划分。

4.4 本章小结 (Summary of this chapter)

本章运用第三章所分析的三种规则格网插值算法和 Delaunay 三角网合成算法对多波束声呐数据进行海底地形模型的构建。使用反距离加权插值、自然邻点插值、克里金插值生成规则格网模型，三种算法的中误差分别是 0.0248、0.0251、0.0247，根据中误差进行精度分析得出基于反距离加权插值算法的海底地形建模效果是最好的。本文提出的合成算法在三角网的顶点选择、拓扑关系上进行了优化改进，在针对数据量巨大的多波束声呐数据时，很大程度上提高了 Delaunay 三角网构网的效率。

5 总结与展望

5 Conclusions and Prospect

5.1 总结 (Conclusions)

随着技术的发展与陆地资源的消耗,为了发展和生存,人类不得不开始探索海洋资源。对于海洋的研究、开发、探测、工程等活动的开展前提都需要取得海底地形信息作为基础依据材料。因此对海底地形进行研究十分有必要。

多波束声呐测深系统是目前进行海底地形测量的首选设备之一,其获取的数据具有高精度、高分辨率、海量密集、离散分布等特点,因此目前被广泛运用在海洋测量方面。本文以多波束声呐测深数据为基础,经过一系列的方法分析与比较,最终选择一种适合多波束声呐数据特点的 Delaunay 三角网建模方法。主要研究工作如下:

- 1、以多波束声呐测深系统的原理出发,研究分析多波束声呐测深系统的工作模式和组成多波束系统的四个子系统。安装在测量船上的多波束系统向船的正下方垂直发射声学信号,获取与测量船的航迹互相垂直的条带水深值,从而生成海底地形。对采集的数据存储文件格式 XTF 的存储数据情况、数据组成、如何解码进行了分析。

- 2、分析比较了反距离加权插值、克里金插值、自然邻点插值三种规则格网插值方法,以及三角网生长算法、逐点插入算法、分治算法三种生成 Delaunay 三角网的方法的优势劣势。针对多波束声呐数据的特点,提出一种 Delaunay 三角网的合成算法。

- 3、对多波束声呐数据进行海底三维模型的构建。分别使用反距离加权插值、自然邻点插值、克里金插值生成规则格网模型,三种算法的中误差分别是 0.0248、0.0251、0.0247,生成模型所耗费时间分别是 3.04 秒、75.1 秒、3.68 秒。利用中误差进行精度分析得出基于反距离加权插值算法的海底地形建模效果是最好的。但由于规则格网在处理海量多波束声呐数据时效率低下,于是使用 Delaunay 三角网对多波束声呐数据进行完整海底地形的三维构建,比较了传统逐点插入算法和改进的合成算法,在时间方面,改进的合成算法大大缩短了构网时间,在地形模型方面,改进的合成算法对地形的局部细节表现得更明显。

5.2 展望 (Prospect)

海底地形三维建模与陆地地形三维建模存在着极大的不同,虽然在原理方法上可互相通用,但是由于海底地形藏匿在海水面之下,进行多波束声呐测量时获取的数据是关于水深值,无法获取海底地形的一些结构特征信息。此外,对海底地形进行测量存在信号穿过水体会出现大幅衰弱问题。因此,生成的海底地形三维模型难以体现海底地形的特征。针对此情况,本文还存在一些不足之处,在今后的进一步研究中将从以下几个方面继续开展工作:

- 1、在规则格网建模的算法方面只选取了目前最常见的三种插值算法,还有其他插值

算法虽然在海底地形建模上运用较少，但也是值得学习的方法。今后会扩展学习范围，为海底地形建模提供更多可选择的算法。

2、影响海底地形模型精度的要素是多方面的，本文仅从建模算法对海底地形模型精度做分析是较为单一的。

3、海底地形环境的可视化研究。由于缺少真实的海底地形环境，对于进一步的可视化表达存在障碍。

参考文献

- [1] 杨广义. 基于多波束测深数据的海底地形建模技术及精度评估研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [2] 李玉成. 浅海数字多波束测深模型设计与仿真[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [3] 苏程. 深水多波束测深侧扫声纳显控系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [4] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [5] 赵建虎,刘经南. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [6] 郭婧. 基于图像分析与处理的海底地貌单元边界提取方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东),2018.
- [7] 温孝胜. 海洋地质学的发展现状与未来展望[J]. 海洋通报, 2000(04):66-73.
- [8] Miller C.L., Laflamme R.A. The digital terrain model-Theory and Application[J]. Photogrammetric Engineering, 1958, 24:433-442P.
- [9] John F. O'Callaghan, David M. Mark. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28(3).
- [10] Jepson S. K., Domingue J.Q. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1988, 54(11):1593-1600.
- [11] David G. Tarboton, Rafael L. Bras, Ignacio Rodriguez-Iturbe. On the extraction of channel networks from digital elevation data[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1).
- [12] William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge, William E. Lorensen. Decimation of triangle meshes[P]. Computer graphics and interactive techniques, 1992.
- [13] George Y. Lu, David W. Wong. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique[J]. Computers and Geosciences, 2007, 34(9).
- [14] David B. Kidner. Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(14).
- [15] Agarwal P K, Arge L,Danner A. From point cloud to grid DEM: A scalable approach[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [16] Alex Beutel, Thomas Mølhave,Pankaj K. Agarwal. Natural neighbor interpolation based grid DEM construction using a GPU[P]. Advances in Geographic Information Systems, 2010.
- [17] Green P J, Sibson R. Computing Dirichlet Tessellations in the Plane[J]. Computer Journal, 1978, 21(2):168-173.
- [18] Michael J. McCullagh, Charles G Ross. Delaunay Triangulation of a Random Data Set for Isarithmic Mapping[J]. The Cartographic Journal, 2013, 17(2).
- [19] Tsai V J D. Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1993, 7(6):501-524P.

- [20] Moore I D, O'Loughlin E M, Burch G J. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications.[J]. Earth surface processes and landforms, 1988,13(4).
- [21] David Thibault, Christopher M. Gold. Terrain reconstruction from contours by skeleton construction[J]. Geoinformatica: An international journal of advances of computer science for geographic, 2000,4(4).
- [22] Lawson C L. Software for C1 surface interpolation[J]. Mathematical Software, 1977:161-194.
- [23] Shamos M I., Hoey D. Clost-point problems Proceedings[C]. IEEE Symposium on Foundations of Computer Science IEEE, 1975:151-162.
- [24] Dwyer R A. A faster divide-and-conquer algorithm fore constructing Delaunay trigulations[J]. Algorithmica, 1987(2):137-151
- [25] Katajainen J., Koppinen M. Constructing Delaunay Triangulations by Merging Buckets in Quad Tree Order[J]. Fundamenta Informaticae XI, 1998, 11(3):275-288
- [26] 夏少芳. 基于不规则三角网的数字地形生成与简化算法研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2008.
- [27] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000(03):260-265.
- [28] 宋敦江, 岳天祥, 龚云, 等. 散乱数据插值的 HASM 方法[J]. 地球信息科学, 2007(03):45-51.
- [29] 吴焕萍, 潘懋, 胡金星, 等. 规则格网 DTM 快速构建算法研究[J]. 计算机应用研究, 2004(06):26-28.
- [30] 王耀革, 朱长青, 王志伟. 基于 Coons 曲面的规则格网 DEM 表面模型[J]. 测绘学报, 2008(02):217-222.
- [31] 何俊, 戴浩, 谢永强, 等. 一种改进的快速 Delaunay 三角剖分算法[J]. 系统仿真学报, 2006(11):3055-3057.
- [32] 祝志恒, 傅鹤林, 蒲浩, 等. 构建 Delaunay 三角网的一种新型生长法——壳外插入法[J]. 铁道科学与工程学报, 2007(06):67-72.
- [33] 王会然. 一种生长法快速构造三角网的算法研究[J]. 城市勘测, 2010(02):146-149.
- [34] 蒲浩, 宋占峰, 詹振炎. 快速构建三角网数字地形模型方法的研究[J]. 中国铁道科学, 2001(06):101-106.
- [35] 徐道柱, 刘海砚. Delaunay 三角网建立的改进算法[J]. 测绘与空间地理信息, 2007(01):38-41.
- [36] 蒋红斐. DEM 快速构建及地形裁剪算法的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002(09):104-107.
- [37] 蒋红斐. 基于分治算法构建 Delaunay 三角网的研究[J]. 计算机工程与应用, 2003(16):81-82+117.
- [38] 孙岚, 刘雁春, 李明叁. 基于多波束数据的海底地形建模技术[J]. 海洋测绘, 2009, 29(01):39-41.
- [39] 曹鸿博, 张立华, 肖振坤, 等. 基于海量多波束数据的海底 DEM 简化精度分析[J]. 测绘科学, 2010, 35(S1):60-62.
- [40] 丁海燕, 姜艳媛, 项慧丽. 海底地形数据处理与 DEM 生成[J]. 地理空间信息, 2009, 7(05):28-31.
- [41] 崔杨, 刘雁春, 暴景阳, 等. 海底 DEM 结构与精度分析[J]. 海洋测绘, 2004(01):38-41.
- [42] 贾俊涛, 翟京生, 谭翼北. 海底地形数据的网格 DEM 内插方法[J]. 海洋测绘, 2003(06):24-26
- [43] 李军, 滕惠忠. 海底三维可视化技术及应用[J]. 海洋测绘, 2004(04):44-47.

- [44] 陆丹, 李海森, 魏玉阔, 等. 多波束测深系统中的海底地形可视化技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(02):450-456.
- [45] 陆丹. 基于联合不确定度的多波束测深估计及海底地形成图技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [46] 欧建良. 基于超图的海底地形分析和特征提取[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [47] 王向红. 多波束条带测深系统数据后置处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [48] 胡清华. 便携式多波束测深系统动态数据归位处理与成图技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [49] 赵建虎. 多波束深度及图像数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [50] 付勇先. 海底地形的多波束测深数据预处理及三维建模方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [51] 王胜平, 卢凯乐. 多波束测深 XTF 格式解析及解码程序研制[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(04):443-448.
- [52] 韩春花, 张俊明, 梁建峰, 等. 侧扫声纳数据管理系统设计与实现[J]. 海洋通报, 2011, 30(2):187-192.
- [53] 韩春花, 殷汝广, 张俊明, 等. XTF 格式侧扫声纳数据格式解析与应用[J]. 海洋信息, 2012(01):17-21.
- [54] 武同元, 居向明, 谢清陆, 等. 多波束.XTF 数据结构与.ALL 数据结构剖析[J]. 北京测绘, 2014, (01):16-21.
- [55] 卢凯乐. 多波束测深数据预处理及系统误差削弱方法研究与实现[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- [56] 胡丽川. 基于多波束与海底管道建模方法的研究与实现[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- [57] 韩富江, 潘胜玲, 王德刚, 等. 基于标准差准则的海底三维地形模型构建[J]. 海洋通报, 2011, 30(06):674-678.
- [58] 张锦明, 郭丽萍, 张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对 DEM 插值误差的影响[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(01):51-56.
- [59] 王可伟, 高利华, 江锋. 基于改进反距离加权算法的海底 DEM 建模方法[J]. 海洋测绘, 2021, 41(01):61-64.
- [60] 陈欢欢, 李星, 丁文秀. Surfer 8.0 等值线绘制中的十二种插值方法[J]. 工程地球物理学报, 2007(01):52-57.
- [61] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2003(03):53-57.
- [62] 高洋, 张健. 基于自然邻点插值的数据处理方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2005(03):346-351.
- [63] 王家耀, 崔铁军, 苗国强. 数字高程模型及其数据结构[J]. 海洋测绘, 2004(03):1-4.
- [64] 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(08):1158-1167.

- [65] 邵春丽, 胡鹏, 黄承义, 等. DELAUNAY 三角网的算法详述及其应用发展前景[J]. 测绘科学, 2004(06):68-71+5.
- [66] 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999(01):30-37.
- [67] 邓曙光, 刘刚. 一种 TIN 生成算法的改进与实现[J]. 计算机时代, 2006(01):1-2.
- [68] Rebay S.. Efficient Unstructured Mesh Generation by Means of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm[J]. Journal of Computational Physics, 1993,106(1).
- [69] 郭吉明, 沈隆钧, 张景琳. Delaunay 三角网格的一种快速生成法[J]. 数值计算与计算机应用, 2001(04):267-275.
- [70] 胡金星, 马照亭, 吴焕萍, 等. 基于格网划分的海量数据 Delaunay 三角剖分[J]. 测绘学报, 2004(02):163-167.
- [71] 王光霞, 张寅宝, 李江. DEM 精度评估方法的研究与实践[J]. 测绘科学, 2006(03):73-75+5-6.

作者简历

一、基本情况

姓名：薛秋珍 性别：女 民族：汉 出生年月：1997-09-29 籍贯：福建省漳州市

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《基于多波束声呐数据的海底三维地形模型构建》，是本人在导师指导下，在江苏海洋大学攻读学位期间进行的研究工作所取得的成果。据我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签字：薛秋珍

2022 年 5 月 30 日

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
多波束声呐；海底三维地形；规格格网建模；不规则格网建模；Delaunay三角网	公开	TP311.1		
学位授予单位名称*	学位授予单位代码*		学位类别*	学位级别*
江苏海洋大学	11641		工学	硕士
论文题名*		并列题名*		论文语种*
基于多波束声呐数据的海底三维地形模型构建		Construction of seabed 3D terrain model based on Multi-beam sonar data		中文
作者姓名*	薛秋珍		学号*	2019220275
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址		邮编
江苏海洋大学	11641	江苏省连云港市		222005
学科专业*	研究方向*	学制*	学位授予年*	
测绘工程	海洋空间信息技术	3 年	2022 年	
论文提交日期*		2022 年 4 月 12 日		
导师姓名*	王晓、何林帮		职称*	副教授、副研究员
评阅人		答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
高祥伟、季民		卢华兴	谢宏全、张存勇	
电子版论文提交格式 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 () 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版(发布)者		电子版论文出版(发布)地		权限声明
论文总页数*		45		

注：共 33 项，其中带*为必填数据，共 22 项。