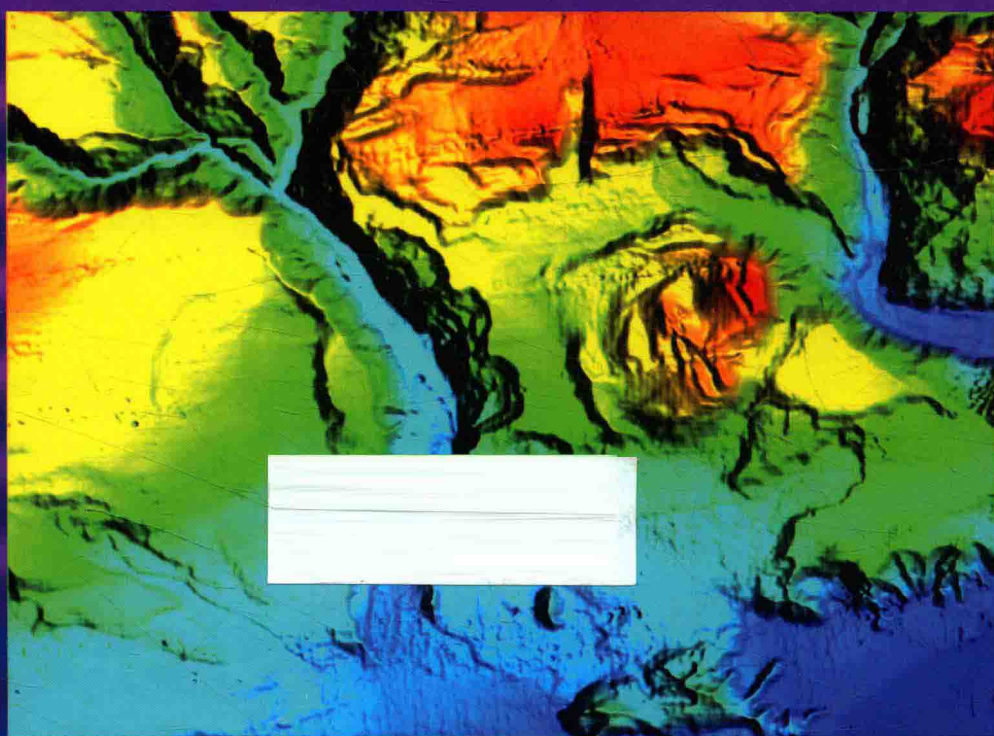


High Resolution
Submarine Geomorphology

高分辨率海底地形地貌 ——可视计算与科学应用

吴白银 等 著



科学出版社

高分辨率海底地形地貌

——可视计算与科学应用

吴自银等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

高分辨率海底地形地貌学是海洋地质和海洋测绘的一个前沿分支,为了解地球外部形状、海底构造运动、海底演化提供了直接依据。近 20 年来,以高精度多波束测深、侧扫声呐和浅地层剖面等为主要技术手段的高分辨率海底地形地貌探测得到快速发展,是国际海洋地学研究的前沿和方向之一,促进了传统海底地貌学向高分辨率和定量化方向的发展,在大陆架划界、海底资源调查、海洋工程建设和海洋军事应用等方面得到了广泛应用。

本套书按照学科的特点,对海底地形地貌探测技术、处理技术、成图技术和科学应用研究等内容进行了详细论述。为便于广大读者了解如何获取并基于地形地貌数据进行科学应用研究,突出了理论研究、技术开发和科学应用三者相结合的特点。全套包括两册,本书为可视计算与科学应用分册,系统论述了成图技术和科学应用研究等方面的内容。本书可供相关方面的专业技术人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生及研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率海底地形地貌:可视计算与科学应用/吴自银等著. —北京:科学出版社, 2017.10

ISBN 978-7-03-052904-6

I. ①高… II. ①吴… III. ①高分辨率—海底地貌 IV. ①P737.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 115441 号

责任编辑:张井飞 韩 鹏 白 丹/责任校对:韩 杨
责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 10 月第 一 版 开本: 787mm×1092mm 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张: 23 1/2

字数: 557 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



著 作 者 名 单

吴自银 阳凡林 李守军 高金耀 章伟艳
金绍华 霍冠英 尚继宏 李怀明 杨克红
李小虎 梁裕扬 马维林 罗孝文 赵荻能
王胜平 丁维凤 曹振轶 许雪峰 朱心科
应建云 周洁琼 熊明宽



部分作者合影（从左至右）：韩鹏（责任编辑），王胜平，张田升，丁维凤，梁裕扬，高金耀，赵获能，吴自银，阳凡林，杨克红，章伟艳，马维林，朱心科，罗孝文

本书中文引用：吴自银，阳凡林，李守军，等. 2017. 高分辨率海底地形地貌——可视计算与科学应用. 北京：科学出版社.

本书英文引用：Wu Z, Yang F, Li S, et al. 2017. High-resolution submarine geomorphology—visual computation and scientific applications. Beijing: Science Press.

海洋覆盖着整个地球表面积的 71%，蕴藏着丰富的资源可供人类使用。早期由于科学条件的限制，人们无法对其进行大规模的开发利用。随着社会经济的发展、人口的膨胀和陆地资源逐渐匮乏，人类加快了海洋资源勘探、开发和利用的步伐。21 世纪，开发和利用海洋这一使命变得越来越迫切。

探测和认知海洋是开发利用海洋的基础，海底地形地貌是认知海洋的最基本参量。受海洋巨厚水层的影响，光和电磁波等陆地常规探测技术在海洋探测中受到了限制，声学探测是认知海洋的主要技术手段。多波束测深系统、侧扫声呐系统和浅地层剖面仪等基于声学原理的高新技术装备是探测海底地形地貌的常用仪器设备。多波束测深系统和侧扫声呐系统是海洋地形地貌测量最常用的工具，前者侧重于声呐测深，后者侧重于声呐成像，而浅地层剖面仪主要通过低频声信号往返穿透海底数十米，甚至上百米的地层，了解沉积物和浅地层的分布情况。对这些新型仪器设备的基本工作原理与方法进行全面的总结和论述，能为海洋探测从业者提供实际帮助。

多波束测深系统、侧扫声呐系统和浅地层剖面仪等海底地形地貌探测技术装备均是多传感器的高度集成，随着组合导航、声学、电子和计算机等技术的发展而飞速发展，采集的数据体现了高精度、高密度、高分辨率和多误差源的特点，数据处理技术也伴随着硬件技术在不断发展。无论是多波束测深系统、侧扫声呐系统，还是浅地层剖面仪，由于受仪器自噪声、海况因素、声呐参数设置和声速剖面等因素的影响，测量资料不可避免地存在误差，对这些设备采集的资料进行精细处理也是必不可少的一环，是进行研究和应用的基础，相关的技术方法总结有助于我国海洋信息技术的发展。

海底地形地貌是海底科学的基本内容，在揭示海底的基本特征、变化规律与动力过程中发挥着重要的基础学科作用。海底地形地貌还是进行海底资源探测与研究的基本资料，中国于 20 世纪 80 年代开展了国际海底多金属结核资源调查，并成功申请了 7.5 万 km^2 的矿区，于 20 世纪 90 年代又在国际

海底进行了富钴结壳和金属热液硫化物的调查与矿区申请，近 10 年来又在中国南海发现了天然气水合物资源。研究表明，这些海底资源的形成与赋存与海底地形有着密切的关系。海底地形地貌研究还为海洋权益维护提供了科技支撑，按照《联合国海洋法公约》进行大陆架划界是当前全球沿海国高度关注的问题，包括大陆坡脚点等系列划界界限点，无不与海底地形地貌密切相关。

建设海洋强国是当代中国海洋人的伟大使命，“关心海洋、认知海洋、经略海洋”，使蓝色海洋变成透明海洋和智慧海洋。海洋探测技术为建设海洋强国提供了重要保障，包括多波束测深系统、浅地层剖面 and 侧扫声呐系统在内的海洋探测设备，正在近海海洋工程探测、陆架管线路由勘查、海洋考古、海洋资源调查、海洋维权和海洋国防等方面发挥着重要作用。在“建设海洋强国”“中国梦”“海上丝绸之路”等国家战略目标的指引下，中国的海洋探测已从近海走向“深蓝”，中国科学考察船活跃在全球三大洋和南北极，科学、规范地开展海洋调查研究工作显得更为重要。

吴自银研究员长期从事海底地形地貌探测与研究，我见证了他从一个青年学子向中年科技工作者成长的历程，他领导的海底地形地貌团队取得了诸多科研成果，这些成果已经服务于国家军事、外交、科研和划界等多方面。《高分辨率海底地形地貌》从学科发展和从业需求的角度，对海底地形地貌信息的获取、处理、分析和应用等进行了系统的论述，可作为海底探测行业的技术参考书，期待其在我国海底探测技术的发展中发挥更大作用。

中国工程院院士

金福忠
2/2 2017

海底是水圈、生物圈和岩石圈的重要地质界面，其不仅记录了水圈、生物圈和岩石圈相互作用的详细信息，还记录了海陆相互作用的过程和海陆变迁的历史，气候演化旋回和沉积过程，板块裂离产生、运动和俯冲消亡的历史，因此，海底为研究古气候、古环境、地貌和板块构造等提供了重要的素材。同时，海底还蕴藏着丰富的烃类资源（石油、天然气和天然气水合物等）、热液硫化物、富钴结壳、多金属结核和深海生物基因等资源，是世界海洋科学研究的重要对象。

海底地形是了解地球外部形状、海底构造运动、海底演化的直接依据，也是海洋经济开发、海洋科学研究和海洋军事应用等方面的重要基础数据。海底地貌是自然作用过程孕育的记录，是一部海岸与海底发展历史过程的“天书”。调查研究海洋地貌类型、物质结构与组合特征的过程，就是判读“天书”，解译海洋地貌的成因、变化状态与发展趋势的过程。中国传统管辖海域面积超过 300 万 km^2 ，包括“四海一洋”：渤海、黄海、东海、南海和台湾以东的太平洋海域。中国海海底地貌类型多样，成因复杂，是一部名副其实的“天书”。研究中国海海底地形地貌特征、沉积结构及发育演变趋势，具有极其重要的科学意义。

近 20 多年来，人类作用已经成为地球系统中的第三驱动力并广受关注，对于人类活动背景下的河口与海岸地形地貌演变规律的研究，既有重要的科学意义，更有重要的工程实际应用意义。大陆架上的自然资源主权属沿海国所有，但在相邻和相对沿海国间，存在具体划界问题。近十余年来，大陆架划界因关系到国家海洋主权权益、资源利益和国家安全，已成为全球沿海国海洋权益争夺的新焦点，海底地形地貌是确定大陆架划界界限必不可少的证据；中国“四海一洋”海疆广阔，但与周边邻国存在诸多划界争议，亟须深化海域划界研究。因此，开展海底地形地貌学的划界应用研究对于维护中国海洋权益更具有重要价值。

20 世纪 20 年代，回声测深技术的出现促进了海底地形地貌学研究的第一次飞跃。基于大量测深数据编绘的大西洋、太平洋和印度洋图集，揭示了

绵延数万千米的大洋中脊和转换断层等巨大地貌单元,为板块构造学说的诞生与发展奠定了重要基础。当前,以多波束测深系统为代表的先进的海底探测技术正在促进海底地形地貌学研究的第二次飞跃。多波束测深系统具有全覆盖、高分辨率和高精度的优点,将海底地形地貌的空间分辨率从单波束测深时代的 $10\sim 1\text{km}$ 级提升至现在的 $10\sim 1\text{m}$ 级。多波束测深系统能分析过去单波束资料难以揭示的海底地形地貌精细特征,将促进海底地形地貌学从定性研究向高分辨率与数字化研究发展。

多波束测深系统、浅地层剖面仪和侧扫声呐系统等地形地貌探测设备已经在当代海洋工程、海洋开发、海洋研究、海底资源环境调查中发挥着极其重要的作用。从航道维护与疏浚到海洋工程的勘测和施工,从边缘海大陆架的勘测到大洋多金属结核及富钴结壳资源的调查,均是这些设备的用武之地。因此,我们有必要对这些技术的国内外研究现状进行总结、分析和对比,了解目前国内在这些领域的研究水平及其与国际研究间的差距,发现存在的问题,为后续的海底探测和研究指明方向。

通过新中国成立以来数十年的发展,尤其是近 20 年来,在国家重大科技项目的支撑下,中国的海洋探测设备研制取得了长足的进步。例如,在多波束测深系统研制方面,哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、浙江大学等分别研制了不同型号的浅水多波束系统,中国科学院声学研究所牵头研制了全海深多波束测深系统,其中有些产品已经商业化。在运载平台方面,中国已经研制了 ROV、AUV、无人艇和无人机等多种产品,有些产品可与国际产品媲美,“蛟龙号”更是其中的佼佼者。此外,海底原位观测仪器、海底观测网、深海工作站研究等方面也取得了优异成果。这些自主研发的海洋技术装备已改善了中国海洋环境的监测能力,提高了中国综合开发、利用海洋资源和海洋灾害防治的能力,还为海域划界和海洋权益维护提供了有力支撑。但需要指出,目前的海底探测技术还远未形成体系,在中国海洋调查中还在大量使用国外设备,国产设备更少有走出国门销往国外的,因此,中国急需发展生产海洋探测技术装备的民族产业。

海洋探测技术正从单一性能仪器向综合性能仪器发展,如中国已经开始研制集多波束、浅地层剖面和侧扫声呐功能于一体的新型装备。随着传感器技术向“小、精、尖”方向发展,可预见有更多“瑞士军刀”式的多功能海洋仪器设备涌现,既能节省设备购置成本,又能降低调查成本。海洋探测正由传统船载走航式向“自主航行”式及海底原位长期观测方向发展,无人船、无人机、

AUV、Glider 等自主航行器已经开始出现在现代海洋调查中,把传统的船载设备无缝移植到这些自主航行器中,在近岸岛礁、复杂浅滩、陆坡峡谷和深海极端环境中进行精密探测,建立“空、天、陆、海”一体的海洋立体探测与观测技术体系,对海洋进行长期实时在线观测必将是全球未来发展的大趋势。

无论是多波束测深系统、侧扫声呐系统,还是浅地层剖面仪,由于受仪器自噪声、海况因素、声呐参数设置和声速剖面等因素的影响,测量资料不可避免地存在假信号,因此,对这些设备采集的资料进行精细处理是必不可少的一环,也是进行深层次开发、应用的基础,一套好的勘测设备还应该与之匹配的后处理软件。多波束测深系统使用最为广泛,一般的商用多波束系统都附带一套相应的后处理成图软件,用于处理自身系统勘测的多波束数据。在笔者导师金翔龙院士的领导下,中国启动了首期海洋 863 重点项目“海底地形地貌与地质构造探测技术”(820-01-01),开启了中国自主海底地形地貌处理技术的研究。

在海底地形地貌探测与研究方面,中国也取得了诸多成果。中国先后在中国海域执行了多个重大国家海洋专项,如国家海洋勘测专项(2000~2003年)、西北太平洋专项(2004~2006年)、外大陆架专项(2006~2008年)、中国近海海洋环境调查专项(2008~2010年)、海洋地质保障工程(2010年至今)、全球海气相互作用专项(2012年至今)等,通过这些专项任务,中国完成了中国海大部分海域的全覆盖探测,地形地貌测线超过 200 万 km。在此基础上,先后编制了系列图件,获得了一批高质量的研究成果,如《南海海洋图集——地质地球物理》(2007年)、《东海区域地质》(2008年)、《中国近海海洋图集——海底地形地貌》(2013年)、《中国近海海洋——海底地形地貌》(2013年)、《中国近海自然环境与资源基本状况》(2015年)。

系统总结近 20 年来中国在海底地形地貌学科中所取得的成果,揭示存在的问题,进一步促进中国海洋科学的发展,也是本书编写的目的之一。首先,要提升理论研究水平,理论研究是进行海洋仪器研制和软件开发的基础,没有高水平的理论研究作为后盾很难研制出高精度的海洋仪器,也不能开发出满足海洋调查研究需求的数据处理软件。目前,中国在多波束和侧扫数据处理方面已经进行了一些理论探索,但在海底声探测技术原创性探索方面仍有较广阔的发展空间。其次,要加强数据利用,通过数十年的海洋调查,中国已经积累了一批高质量的海底声探测数据资料,包括单波束测深、多波束测深、侧扫声呐图像和浅地层剖面等,这些数据资料涉及的海区包括

近海海岸带、大陆架专属经济区、边缘海盆地和国际海底区域等。在调查资料的基础上进行深层次的理论研究,发现并解决存在的海底科学问题,从而为海洋资源的开发利用和海洋权益维护提供及时服务。

全书由吴自银提出详细的撰写提纲,撰写组几经讨论与修改,按照本学科的基本工作思路与流程,将本书分为两册:探测处理理论与技术、可视计算与科学应用。本书为可视计算与科学应用,共计8章,其中,第1章由吴自银、高金耀、周洁琼和赵荻能撰写,第2章由吴自银和阳凡林撰写,第3章由吴自银、李守军和尚继宏撰写,第4章由吴自银、高金耀、赵荻能、阳凡林和李守军撰写,第5章由尚继宏、李守军、梁裕扬和吴自银撰写,第6章由金绍华、王胜平和吴自银撰写,第7章由霍冠英撰写,第8章由章伟艳、李怀明、杨克红、李小虎、马维林和吴自银撰写。前言和后记由吴自银撰写,全书由吴自银和阳凡林统稿。

本书是多个国家科研项目研究成果的升华与总结,相关研究先后受到国家自然科学基金项目(41476049、41376108、41576099)、全球变化与海气相互作用专项、国家基础性工作专项(2013FY112900)、国家863计划项目(2002AA616010、2007AA090901)、科技支撑计划项目(2014BAB14B01)和国家海洋公益专项(201105001)等系列科研项目的资助。

本书体现了系统性和全面性的特点,按照海底地形地貌学科的特点,囊括了海底地形地貌探测、处理、成图和应用研究等方面;还体现了创新性和前瞻性的特点,尤其是在处理技术和成图技术方面,其是著作团队多年研究成果的总结,其中一些技术还申请了国内和国际发明专利;为便于广大读者了解如何基于地形地貌数据进行科学研究,还特别突出了实用性和应用性,这在同类著作中是少见的。

作者导师金翔龙院士在百忙中审阅了本书,并为本书作序,李家彪院士审阅了本书,并提出了指导意见,王小波研究员审阅了本书并提出了结构性的建议,郑玉龙研究员大力支持本书的研究工作,在此一并致谢!

本书可供一线科研人员使用,也可作为本学科基础教育及研究生学习的教材。因作者水平有限,本书难免存在疏漏之处,或者文献引用不当之处,为了更好地推动本学科的发展,敬请各位同行专家批评指正!

著者:吴自银

2017年9月29日



序言
前言

第一篇 海底自动成图技术与可视计算

第 1 章 海底数字地面模型建立方法与应用	3
1.1 常用的海底 DTM 的构建方法	3
1.1.1 距离反比加权内插法	3
1.1.2 样条函数内插法	4
1.1.3 Kriging 内插法	6
1.2 多源数据融合的 DTM 构建方法	8
1.2.1 基本技术流程	8
1.2.2 关键技术步骤	9
1.3 基于 DTM 的可视计算	11
1.3.1 基于 DTM 的定量运算	11
1.3.2 基于 DTM 的可视交互计算	15
1.4 基于 DTM 的海底地形特征识别方法	17
1.4.1 实验数据及预处理	18
1.4.2 最优方向剖面法自动识别沙波脊线与谷线	20
1.4.3 实验与分析	24
参考文献	28
第 2 章 海底地形地貌图件绘制技术与方法	30
2.1 多波束海底填色图构建方法	30
2.1.1 跟踪 DTM 边界线	31
2.1.2 非封闭等值线端点顺序插入 DTM 边界	33
2.1.3 非封闭等值线建立拓扑关系	34
2.1.4 基于 DTM 边界跟踪封闭多边形并建立嵌套关系	34
2.1.5 按嵌套顺序实现等值线填色	36

2.2	多波束水深图构建方法	38
2.2.1	水深图构建的基本流程	39
2.2.2	DTM 的构建与模型分块	39
2.2.3	基于 DTM 提取特征点	40
2.2.4	提取原始多波束水深点	41
2.3	海底地貌图构建方法	43
2.3.1	自动拓扑查错	43
2.3.2	结点网络建立	44
2.3.3	自动封闭跟踪	45
2.3.4	自动嵌套排序	46
2.3.5	人机交互填色	47
2.4	海底地形三维图构建方法	47
2.4.1	海底地形的数据组织及调度	48
2.4.2	海底地形的实时渲染加速技术	53
	参考文献	57
第 3 章	基于图形学的大陆架划界技术与方法	60
3.1	大陆架划界基本概念	60
3.1.1	《公约》中的相关定义	61
3.1.2	《海洋法公约》第 76 条	63
3.1.3	沿海国在确定大陆架外部界限时应遵循程序	64
3.1.4	相关技术与方法	64
3.2	基于图形学的大陆架划界方法	65
3.2.1	划界技术流程	67
3.2.2	划界技术方法	67
3.2.3	划界实例分析	70
3.3	大陆坡脚点自动识别方法	72
3.3.1	大陆坡脚点的定义及确定原则	73
3.3.2	确定的基本原则	73
3.3.3	大陆坡脚点的自动识别	74
3.3.4	应用实例分析	80
3.4	东海大陆架划界的关键界限识别研究	80
3.4.1	资料与方法	81
3.4.2	冲绳海槽地形基本特征	81
3.4.3	冲绳海槽地形地貌界限的确定	82
3.4.4	影响地形地貌界限分布的若干因素	89
	参考文献	90

第 4 章 海底自动成图系统 MBMap 的基本功能	94
4.1 成图系统的基本构架	94
4.1.1 基于图层结构的海底自动成图系统	94
4.1.2 成图系统的图形对象分类	96
4.1.3 成图系统的界面与主菜单设计	98
4.1.4 成图系统的主要功能	99
4.2 坐标系统与投影变换	102
4.2.1 海底地形地貌测量中常用的坐标系统	102
4.2.2 海底地形地貌测量中常见的投影变换	106
4.2.3 测点的位置归算	109
4.3 成图系统底层图形库设计	113
4.3.1 成图系统的基本符号库	113
4.3.2 海底制图的注记方法	119
4.3.3 多分辨率海岸线库	122
4.4 常用数据交换格式	125
4.4.1 MapInfo 的交换文件结构	125
4.4.2 MapGIS 的交换文件结构	129
4.4.3 AutoCAD 的交换文件结构	131
4.4.4 ArcInfo 交换数据格式	133
4.4.5 PostScript 文件结构	134
4.5 基于成图系统 MBMap 构建的典型成果图	136
参考文献	140

第二篇 海底地形地貌探测技术应用

第 5 章 海底地貌学研究应用	145
5.1 东海陆架海底沙脊地貌学研究	145
5.1.1 沙脊走向统计	148
5.1.2 沙脊走向分区	149
5.1.3 多期次叠加的沙脊	150
5.1.4 沙脊成因探讨	151
5.1.5 东海陆架沙脊演化	153
5.1.6 五点认识	156
5.2 南海北部陆坡天然气水合物地貌识别标志研究	156
5.2.1 研究区概况	156
5.2.2 浅表层声学响应与成因机制	158

5.2.3	水合物区单道地震地层响应	160
5.2.4	天然气水合物沉积地层年代	161
5.3	南海马尼拉海沟构造地貌学研究	163
5.3.1	研究区域背景	164
5.3.2	构造地貌特征分析	165
5.3.3	构造地貌发育规律讨论	168
5.3.4	五点认识	170
5.4	西南印度洋中脊构造地貌学研究	170
5.4.1	区域地质背景	171
5.4.2	地形地貌分析	172
5.4.3	洋脊构造与岩浆过程分析	179
5.5	海底地理实体命名应用研究	182
5.5.1	国际海底地形命名现状	182
5.5.2	国际海底地形命名规则和支撑技术	183
5.5.3	我国在国际海底地形命名领域的研究进展	185
	参考文献	189
第6章	声学海底底质分类	198
6.1	海底底质分类技术的发展现状	199
6.1.1	回波强度数据处理研究	200
6.1.2	特征提取和特征选择研究	201
6.1.3	分类方法研究	201
6.2	海底底质性质与声学分类原理	201
6.2.1	海底沉积物物理性质	202
6.2.2	海底沉积物地声性质	205
6.2.3	海底表面粗糙度	205
6.2.4	海底底质声学分类原理	207
6.3	海底声学回波数据处理	221
6.3.1	海底回波强度数据解译	221
6.3.2	多波束回波强度的数据处理	228
6.4	海底底质分类特征提取	241
6.4.1	时序回波信号特征提取	241
6.4.2	声呐图像特征提取	242
6.4.3	平均反向散射强度随入射角变化曲线特征提取	245
6.5	海底底质分类方法	247
6.5.1	基于SOFM网络底质分类	248
6.5.2	基于K-均值算法底质分类	251

6.5.3 支持向量机 (SVM) 底质分类	252
6.5.4 基于遗传算法的小波神经网络的底质分类	254
参考文献	257
第 7 章 海底目标自动检测与识别	265
7.1 基于侧扫声呐目标检测的研究现状	265
7.2 主动轮廓模型与水平集方法	269
7.2.1 主动轮廓模型及其发展	269
7.2.2 变分法和梯度下降法	272
7.2.3 曲线演化理论	274
7.2.4 水平集方法	274
7.3 RSF 主动轮廓模型与去噪方法	278
7.3.1 RSF 主动轮廓模型	278
7.3.2 非局部均值去噪方法	279
7.4 基于非局部均值降斑和边缘约束 RSF 模型的分割方法	280
7.4.1 基于 K -均值聚类的粗分割	281
7.4.2 基于边缘约束 RSF 模型的精细分割	282
7.4.3 轮廓演化的收敛条件	284
7.5 应用实例分析	284
7.5.1 实验数据集	285
7.5.2 实验结果与评价	285
7.5.3 三种方法的实验结果对比	291
7.6 目标检测软件界面与使用说明	295
参考文献	296
第 8 章 国际海底矿产资源评价中的应用	301
8.1 多金属结核	303
8.1.1 研究概况	303
8.1.2 多金属结核基本分布规律	305
8.1.3 多金属结核基本成因机理	309
8.1.4 多金属结核评价方法	310
8.2 钴结壳	313
8.2.1 研究概况	313
8.2.2 钴结壳基本分布规律	314
8.2.3 钴结壳基本成因机理	323
8.2.4 钴结壳评价方法	324
8.3 多金属硫化物	329
8.3.1 研究概况	329

8.3.2 多金属硫化物分布特征	330
8.3.3 多金属硫化物成矿作用	332
8.3.4 多金属硫化物评价方法	338
参考文献	341
后记与展望——中国海洋科学调查与研究正由近海走向全球	350
名词及索引	353