

“十三五”国家重点图书



湖北省学术著作
Hubei Special Funds for
Academic Publications 出版专项资金

海洋测绘丛书

海岛礁测量技术

党亚民 章传银 周一 卢秀山 薛树强 著

Oceanic
Surveying And Mapping

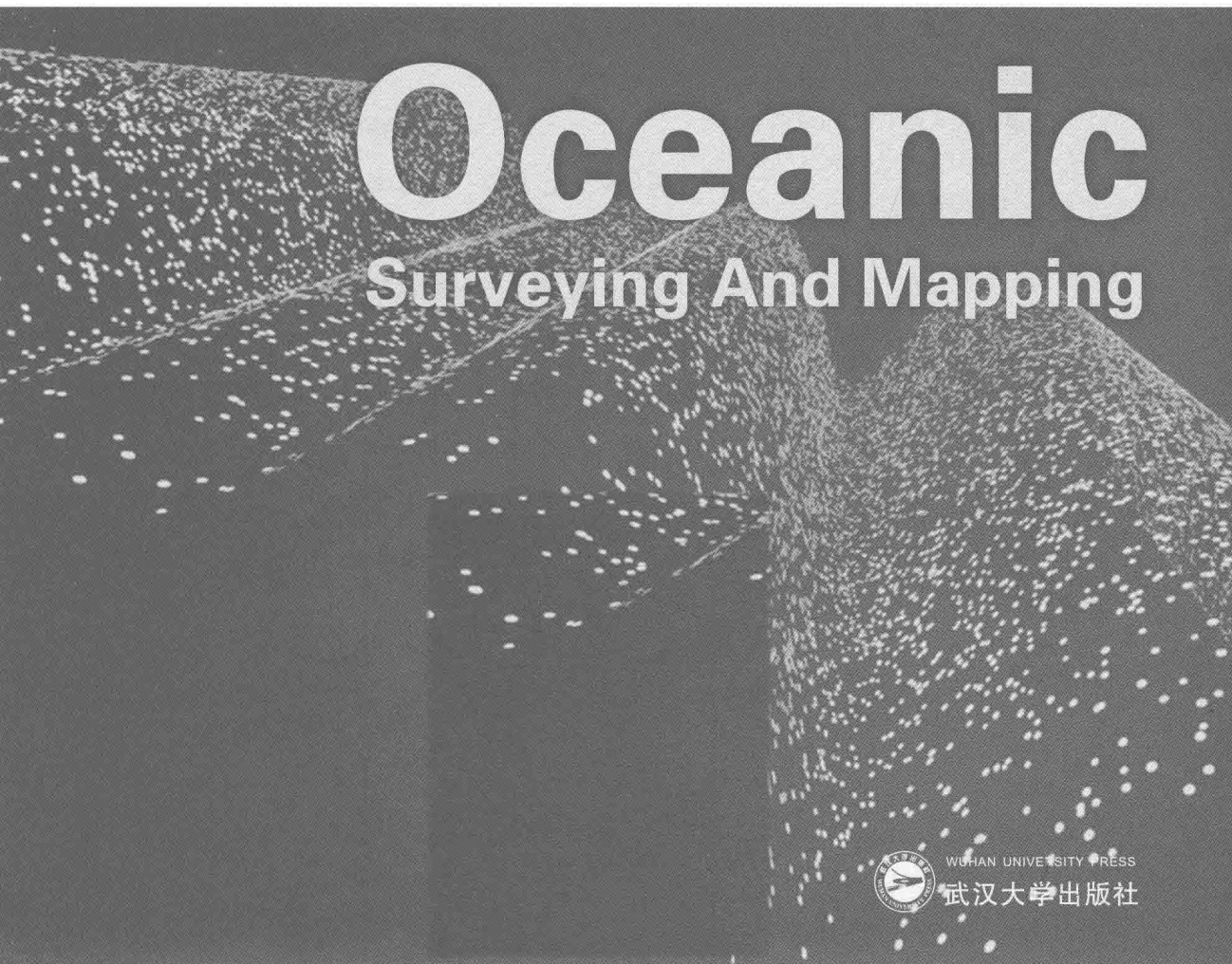


WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

海洋测绘丛书

海岛礁测量技术

党亚民 章传银 周一 卢秀山 薛树强 著



Oceanic

Surveying And Mapping



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

海岛礁测量技术/党亚民等著. —武汉: 武汉大学出版社, 2017. 11
海洋测绘丛书

“十三五”国家重点图书 湖北省学术著作出版专项资金资助项目
ISBN 978-7-307-16615-8

I. 海… II. 党… III. 海洋测量 IV. P229

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 259511 号

责任编辑: 鲍 玲

责任校对: 汪欣怡

版式设计: 韩闻锦

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北睿智印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 11.75 字数: 273 千字 插页: 1

版次: 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16615-8 定价: 30.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换

学术委员会

主任委员 宁津生

委 员 (以姓氏笔画为序)

宁津生 任廷琦 李建成 李朋德 杨元喜 杨宏山
陈永奇 陈俊勇 周成虎 欧吉坤 金翔龙 翟国君

编委会

主 任 任廷琦

副 主 任 李建成 卢秀山 翟国君

委 员 (以姓氏笔画为序)

于胜文 王瑞富 冯建国 卢秀山 田 淳 石 波
艾 波 任廷琦 刘焱雄 孙 林 许 军 阳凡林
吴永亨 张汉德 张立华 张安民 张志华 张 杰
李建成 李英成 杨 鲲 陈永奇 周丰年 周兴华
欧阳永忠 罗孝文 胡兴树 赵建虎 党亚民 桑 金
高宗军 曹丛华 章传银 翟国君 暴景阳 薛树强

序

现代科技发展水平已经具备了大规模开发利用海洋的基本条件；21 世纪，是人类开发和利用海洋的世纪。在《全国海洋经济发展规划》中，全国海洋经济增长目标是：到 2020 年海洋产业增加值占国内生产总值的 20% 以上，并逐步形成 6~8 个海洋主体功能区域板块；未来 10 年，我国将大力培育海洋新兴和高端产业。

我国海洋战略的进程持续深入。为进一步深化中国与东盟以及亚非各国的合作关系，优化外部环境，2013 年 10 月，习近平总书记提出建设“21 世纪海上丝绸之路”。李克强总理在 2014 年政府工作报告中指出，抓紧规划建设“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”；在 2015 年 3 月国务院常务会议上强调，要顺应“互联网+”的发展趋势，促进新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业等的融合创新。海洋测绘地理信息技术，将培育海洋地理信息产业新的增长点，作为“互联网+”体系的重要组成部分，正在加速对接“一带一路”，为“一带一路”工程助力。

海洋测绘是提供海岸带、海底地形、海底底质、海面地形、海洋导航、海底地壳等海洋地理环境动态数据的主要手段，是研究、开发和利用海洋的基础性、过程性和保障性工作；是国家海洋经济发展的需要、海洋权益维护的需要、海洋环境保护的需要、海洋防灾减灾的需要、海洋科学研究的需要。

我国是海洋大国，海洋国土面积约 300 万平方千米，大陆海岸线长约 1.8 万千米，岛屿 1 万多个；海洋测绘历史欠账很多，未来海洋基础测绘工作任务繁重，对海洋测绘技术有巨大的需求。我国大陆水域辽阔，1 平方千米以上的湖泊 2700 多个，面积 9 万多平方千米；截至 2008 年年底，全国有 8.6 万个水库；流域面积大于 100 平方千米的河流 5 万余条，内河航道通航里程达 12 万千米以上；随着我国地理国情监测工作的全面展开，对于海洋测绘科技的需求日趋显著。

与发达国家相比，我国海洋测绘技术存在一定的不足：(1) 海洋测绘人才培养没有建制，科技研究机构稀少，各类研究人才匮乏；(2) 海洋测绘基础设施比较薄弱，新型测绘技术广泛应用缓慢；(3) 水下定位与导航精度不能满足深海资源开发的需要；(4) 海洋专题制图技术落后；(5) 海洋测绘软硬件装备依赖进口；(6) 海洋测绘标准与检测体系不健全。

特别是海洋测绘科技著作严重缺乏，阻碍了我国海洋测绘科技水平的整体提升，加重了海洋测绘科学研究和工程技术人员在掌握专门系统知识方面的困难，从而延缓了海洋开发进程。海洋测绘科学著作的严重缺乏，对海洋测绘科学水平发展和高层次人才培养进程的影响已形成了恶性循环，改变这种不利现状已到了刻不容缓的地步。

与发达国家相比，我国海洋测绘方面的工作起步较晚；相对于陆地测绘来说，我国海

洋测绘技术比较落后，缺少专业、系统的教育丛书，大多数相关书籍要么缺乏，要么已出版 20 年以上，远不能满足海洋测绘专门技术发展的需要。海洋测绘技术综合性强，它与陆地测绘学密切相关，还与水声学、物理海洋学、导航学、海洋制图、水文学、地质、地球物理、计算机、通信、电子等多学科交叉，学科内涵深厚、外延广阔，必须系统研究、阐述和总结，才能一窥全貌。

就海洋测绘著作的现状和社会需求，山东科技大学联合从事海洋测绘教育、科研和工程技术领域的专家学者，共同编著这套《海洋测绘丛书》。丛书定位为海洋测绘基础性和技术性专业著作，以期作为工程技术参考书、本科生和研究生教学参考书。丛书既有海洋测量基础理论与基础技术，又有海洋工程测量专门技术与方法；从实用性角度出发，丛书还涉及了海岸带测量、海岛礁测量等综合性技术。丛书的研究、编纂和出版，是国内外海洋测绘学科首创，深具学术价值和实用价值。丛书的出版，将提升我国海洋测绘发展水平，提高海洋测绘人才培养能力；为海洋资源利用、规划和监测提供强有力的基础性支撑，将有力促进国家海权掌控技术的发展；具有重大的社会效益和经济效益。

《海洋测绘丛书》学术委员会

2016 年 10 月 1 日

前 言

海洋约占整个地球表面积的 70.8%，蕴藏着丰富的资源，海岛礁是人类开发海洋的重要基地。精确的海岛礁基础地理空间信息是海洋综合管理、海洋经济开发的重要依据。开展海岛礁测量与地理信息获取，需要构建与陆地一致的海岛礁测绘基准，并在此基础上利用航空航天技术开展海岛礁识别定位与地形图测绘，生产海岛礁矢量地形数据、数字高程模型、数字正射影像图、制图数据等数字产品。

本书共分为 6 章，涵盖了海岛礁坐标基准、高程基准与垂直基准、海岛礁识别定位、海岛滩涂与岸线测量、海岛遥感测图等内容。第 1 章为绪论，介绍了海岛礁测绘主要任务、技术进展以及海岛礁测量技术。第 2 章介绍了海岛礁大地控制网、坐标基准实现方法以及快速控制测量等内容。第 3 章简要介绍了海洋垂直基准有关概念，重点介绍了海岛礁高程基准、海洋深度基准构建基本理论与技术方法，介绍了高程基准与深度基准的相互转换技术。第 4 章介绍了海岛礁遥感识别定位的基本原理与方法，重点介绍了基于多源遥感的海岛礁识别与精确定位技术。第 5 章介绍了海岛滩涂与岸线测量技术和方法，着重阐述海岛滩涂与岸线测量的主要任务，在此基础上介绍海岛滩涂地形测量与基于遥感的海岛岸线测量技术和方法。第 6 章介绍了海岛遥感测图基础理论、航空航天遥感测图影像获取、像控布测和像片调绘等测图理论和技术方法，针对海岛礁分布零散、远离大陆的地理分布特性，重点介绍了 IMU/GPS 等辅助空中三角测量技术。

本书紧密结合国内外海岛礁测绘最新技术进展，突出海岛礁测量的技术特点，在叙述上力求清晰准确，以期读者对海岛礁测量有一个全面系统的了解。本书第 1、第 2 章由党亚民、薛树强编写；第 3 章由章传银编写；第 5 章由章传银、党亚民和卢秀山编写；第 4 章由周一、党亚民和薛树强编写；第 6 章由周一编写；全书由党亚民统稿、卢秀山校审。陈俊勇院士、宁津生院士、杨元喜院士、李建成院士和周成虎院士对本书的编写给出了许多指导意见和建议；海军大连舰艇学院暴景阳教授和许军博士、国家海洋局第一海洋研究所周兴华研究员和马毅研究员、中测新图薛艳丽研究员和范风云、山东科技大学阳凡林教授、广东国土测绘院茹仕高高工、海南测绘地理信息局胡兴树高工和李富强高工、中国测绘科学研究院王亮研究员、刘正军研究员、杨强博士、柯宝贵博士、蒋涛博士等对本书的编写提供了许多帮助；本书编写还得到了“927”工程项目办公室领导和专家的大力支持，在此一并表示感谢。本书出版得到了“863”重点项目(2009AA121405)、“863”科技支撑项目(2012BAB16B00)以及湖北省学术著作出版专项资金资助项目的支持。由于作者水平有限，书中错误与不当之处在所难免，诚恳欢迎读者批评指正。

作 者

2017 年 6 月于北京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 海岛礁坐标基准	1
1.1.2 海岛礁垂直基准	2
1.1.3 海岛礁遥感识别与精确定位	2
1.1.4 海岛滩涂与岸线测量	2
1.1.5 海岛航空航天遥感测图	2
1.2 海岛礁测量技术进展	3
1.2.1 海岛礁坐标基准现状	3
1.2.2 高程基准现状	3
1.2.3 深度基准现状	4
1.2.4 重力基准现状	5
1.2.5 海岛礁遥感识别定位与海岛测图	6
1.3 海岛礁测量技术	7
1.3.1 海岛礁坐标基准建立	7
1.3.2 海岛礁垂直基准构建	7
1.3.3 海岛滩涂与岸线测量技术	8
1.3.4 海岛礁精确定位与海岛测图	8
第2章 海岛礁坐标基准	9
2.1 概述	9
2.2 海岛礁大地控制网	9
2.2.1 海岛礁大地控制测量	9
2.2.2 平面、高程与重力并置测量	12
2.2.3 GNSS 并置长期验潮观测	14
2.2.4 海岛礁坐标基准建立	16
2.3 海岛礁快速定位技术	23
2.3.1 海岛礁快速定位特点	23
2.3.2 GNSS 相对定位技术	24
2.3.3 GNSS 精密单点定位技术	26

第3章 海岛礁垂直基准	29
3.1 概述	29
3.2 海岛礁高程基准	30
3.2.1 地球重力场基本概念	31
3.2.2 地面与海洋重力测量	35
3.2.3 (似)大地水准面确定	40
3.2.4 海岛礁高程基准建立	44
3.3 海洋潮汐与深度基准	46
3.3.1 海洋验潮与调和分析	46
3.3.2 深度基准面	51
3.3.3 净空基准面	52
3.4 高程基准与深度基准转换	53
3.4.1 高程基准与深度基准转换方法	53
3.4.2 海岛礁跨海高程传递方法	54
3.4.3 海岛礁瞬时水位推算方法	56
3.4.4 GNSS 代替验潮水位控制测量	57
第4章 海岛礁遥感识别定位	58
4.1 概述	58
4.1.1 海岛礁界定	58
4.1.2 海岛类型	59
4.1.3 海岸线及其类型	60
4.1.4 海岛界定原则	60
4.2 海岛礁遥感识别	61
4.2.1 海岛礁识别影像类型	61
4.2.2 海岛礁识别遥感影像数据参数	65
4.2.3 海岛礁识别影像处理技术	70
4.2.4 海岛礁识别方法	74
4.3 海岛礁遥感定位	76
4.3.1 航天遥感影像传统几何纠正	76
4.3.2 RFM 通用成像模型影像纠正	79
4.4 海岛礁识别定位流程	85
4.4.1 航天遥感影像订购获取	86
4.4.2 影像控制点测量	86
4.4.3 稀少(无)控制区域网平差	88
4.4.4 数字正射影像(DOM)制作	92
4.4.5 海岛礁识别定位数据采集	94
4.4.6 大陆岸线的数据采集	96

4.4.7 海岛礁独立地理统计单元	99
4.5 海岛礁遥感影像识别定位案例	101
第5章 滩涂与岸线测量	104
5.1 海岸带、海岸线与滩涂	104
5.1.1 海岸带	104
5.1.2 海岸线	105
5.1.3 滩涂	106
5.1.4 几个常用的术语	107
5.2 海岛滩涂与岸线测量	107
5.3 海岛滩涂地形测量方法	108
5.3.1 机载激光雷达地形测量技术	108
5.3.2 双波段浅海机载激光测深技术	114
5.3.3 双介质水下地形摄影测量技术	122
5.4 立体测图环境中海岛岸线测量方法	124
第6章 海岛航空航天遥感影像测图	126
6.1 概述	126
6.2 遥感影像测图基础	127
6.2.1 立体测量原理	127
6.2.2 摄影测量基础	128
6.2.3 航空影像立体测图	131
6.2.4 航天影像立体测图	131
6.2.5 测图产品	131
6.3 海岛遥感测图	133
6.3.1 海岛遥感影像获取	134
6.3.2 外业像片控制测量与调绘	143
6.3.3 区域网空中三角测量	150
6.3.4 海岛测图	156
6.4 海岛测图应用案例	162
6.4.1 航空影像测图	162
6.4.2 航天遥感测图	165
参考文献	169

第1章 绪 论

现代测绘正从陆地向广阔海洋、地球之外的深空发展。海洋面积占地球面积的 70% 以上,蕴藏着丰富的资源,已成为人类未来最有希望的资源空间。21 世纪是加快开发利用海洋资源、扩大海洋产业、发展海洋经济的世纪。人类开发利用海洋的过程,是一个由海岸向近海,再向外海及大洋的推进过程。全面开展海岛礁测绘,构建海岛礁高精度测绘基准,测量海岛礁精确位置,测制大比例尺地形图,是发展海洋经济和开发利用海岛的前期性、基础性工作。

1.1 概述

精确的海岛礁地理空间信息是海岛海洋管理、经济开发、海防安全的重要依据。根据《联合国海洋法公约》,海岛是划分内水、领海和 200 海里专属经济区等管辖海域的重要标志,一些国家为此通过立法确立了海岛的重要地位,如日本制定了《孤岛振兴法》、韩国制定了《岛屿开发促进法》、我国制定了《海岛保护法》。我国主要海岛(礁)位于亚洲大陆东部,太平洋西部边缘,西部自北向南为我国的辽宁、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、台湾、广东、广西、海南等省、市、自治区,东部与朝鲜半岛、日本为邻,南部周边为菲律宾、马来西亚、文莱、印度尼西亚和越南等国环绕,共有约 12000 个。我国海岛具有以下 4 个特征:一是大部分海岛分布在沿海海域,距离大陆小于 10 千米的海岛占总数的 70% 左右。二是基岩岛的数量最多,占总数的 93%;沙泥岛(冲积岛)占 6.2%,主要分布在渤海和一些大河河口;珊瑚岛数量很少,仅占 0.4%,主要分布在台湾海峡以南海区。三是海岛呈明显的链状或群状分布,大多数以列岛或群岛的形式出现。四是面积小于 5 平方千米的小岛数量最多,占总数的 98%。

和传统的陆地测绘类似,海岛礁测绘的主要任务包括海岛礁测绘基准构建、地形测图、地图表达等。其中海岛礁测绘基准主要包括坐标基准、垂直基准(高程基准和深度基准)和重力基准。海岛礁地形测图主要利用航空和卫星影像资料进行地形图测绘,完成海岛礁矢量地形数据、数字高程模型、数字正射影像图、制图数据等数字产品。

1.1.1 海岛礁坐标基准

建立海岛礁坐标基准需要在大陆沿岸及岛礁布测大地控制网(CORS 基准站和基准点等),按照相关规范实施控制测量,通过对观测数据进行处理实现海岛礁坐标参考框架。为了维持海岛礁坐标基准的现势性,需要定期对大地控制网进行复测。可通过联测已有海岛礁大地控制点(如天文大地控制网点),实现已有测绘成果的转化与应用。在我国建立

海岛礁坐标基准需要充分考虑与 CGCS2000 坐标基准的有效衔接,并联测已有海岛礁三角点。

1.1.2 海岛礁垂直基准

垂直基准一般包括高程基准和深度基准。构建海岛礁垂直基准的主要任务是精化高程基准参考面——似大地水准面,确定深度基准面,建立高程基准与深度基准之间的转换模型,实现海岛礁高程及周边海域深度基准的传递。精化海域大地水准面需要获取海域及周边重力场数据;建立深度基准面模型需要采用验潮数据,确定高精度海洋潮汐模型;确定高程基准与深度基准之间的转换关系需要确定长期平均海面和海面地形模型,采用长期验潮站和 CORS 站并置技术,建立高程基准与深度基准之间的严密数值关系。

1.1.3 海岛礁遥感识别与精确定位

海岛礁遥感识别与精确定位主要是指精确确定哪些目标是海岛礁及其具体地理位置分布。海岛礁遥感识别的首要任务是利用遥感影像探测确定一个目标或特征目标的客观存在,进一步根据图像上的目标细微特征,识别这一实体的准确度,并规划海岛礁的类别,查清海岛数量。精确定位是利用高精度的海水潮汐预报与水位推算、高精度卫星静态定位基线测量、卫星静态定位、大范围稀少控制的高精度高分辨率卫星遥感测图等新技术,融合多种相对或绝对控制技术,解决海岛航空立体测图和非立体影像高精度纠正的控制布测及稀少特征的遥感控制传递技术,实现海岛礁遥感识别与精确定位。

1.1.4 海岛滩涂与岸线测量

海海岸线是平均大潮高潮面与海岸的交接线,零米等深线是深度基准面与海岸的交接线。通常情况下,陆地地形测量注重平均大潮高潮面以上陆地部分的地形要素测量,水深测量注重零米等深线以下海域水下地形测量。海岛滩涂与岸线测量的目的,就是实现海岛及周边海域平均大潮高潮面与深度基准面之间的全要素测量。其主要任务包括:海岛滩涂(潮间带)地形测量;海岛周边海礁、干出滩、群礁及其他水面要素测量;海岛岸线(平均大潮高潮线)、平均水位线与零米等深线测量;为了精确测定平均水位线和零米等深线,还应进行海岛周边浅水水深测量。

1.1.5 海岛航空航天遥感测图

海岛测图产品主要包括矢量地形数据(DLG)、数字高程模型(DEM)、数字正射影像图(DOM)等。为全面掌握海岛地形地貌的基础性地理信息资料,采用传统全野外测图方式,存在登岛难度大,测图成本高,测图周期长等困难,而且,目前大多数海岛仍为地理盲区,无法获取海岛测图产品。随着遥感科学技术发展,采用航空航天遥感数据进行海岛测图,可实现海岛高效率、高精度非接触式测图,实现近海、远海以及不宜、不易到达的海岛测图工作。像片调绘是航空航天数据内业成图的一项重要工作,根据影像,借助相应的仪器设备,提供丰富的地面信息,为海岛测绘产品制图提供必要的地形要素。

1.2 海岛礁测量技术进展

1.2.1 海岛礁坐标基准现状

早在三国时期,魏国数学家刘徽的《海岛算经》(原名《重差》)是一部关于测高望远之术的专著,论述了海岛高程测量方法。经纬仪和测距仪的发展,使三角高程测量精度大幅度提高。精密跨海高程传递测量是一种三角高程传递技术,我国海南岛高程基准的传递就是利用这一方法以大地四边形图形结构观测实施的。静力水准法利用流体静力平衡原理,采用连通管实现跨海高程传递,是目前短距离高程传递精度最高的高程传递方法,但经费十分昂贵。

人造卫星相比于自然天体更靠近地球,这为更好地解决一些大地测量问题创造了得天独厚的条件(胡明城,1989)。卫星大地测量利用人造地球卫星测定地球上任何点(包括大陆和海岛上)的点位信息,以及测定地球重力场和地球形状、大小等。其精度比传统大地测量高2~3个数量级,长距离相对定位精度可达到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$;点间不必通视,可测量几十、几百至数千公里的边长,用于海岛和洲际联测。基于卫星多普勒观测技术可在全球范围内建立一定精度的地面控制网,解决了传统地面三角测量技术相邻三角点之间必须互相通视的制约,可很好地解决陆岛及岛间坐标基准联测的难题。利用传统大地测量技术,很难在孤立且远离大陆的海岛上实现大陆坐标基准传递,一般只能建立地方参心坐标基准。随着空间大地测量的崛起,测定地面点水平位置的几何大地测量方法已被现代大地测量方法所取代。

1987年,我国采用MX-5102型单频多普勒卫星导航仪对仙人礁、信义礁、舰长礁和半月礁进行了定位测量。1988年,测量队员再次随同科考队赴南沙,登上了仙宾礁、美济礁、仙娥礁、牛车轮礁、半月礁、海口礁、信义礁、仁爱礁、舰长礁、半路礁、南通礁、南屏礁等12个礁采用MX-1502大地型多普勒卫星定位仪对海口礁、仁爱礁、信义礁进行了定位。

世界各国利用GPS技术优势,在短时间内建立了大量大地控制网。1990年,国家测绘局委托武汉测绘科技大学组织实施南沙岛礁定位联测工作,中国地震局武汉地震研究所派员携带3台WILD WM-102 GPS双频接收机参加联测工作,联测了南海三个岛的大地坐标。为该地区1:50万海图测绘提供大地控制依据,推求适用于该地区的坐标转换参数。1994年,国家测绘局委派中国测绘工程规划设计中心、武汉测绘科技大学、广东省国土厅等单位参加了南沙科学考察,在途中用3台Trimble 4000sst GPS接收机对永暑礁、浩碧礁、半月礁、信义礁、仁爱礁、三角礁、华阳礁、皇路礁等8个岛礁进行了联测。

1.2.2 高程基准现状

高程基准定义了陆地和海岛礁高程测量的起算点。我国高程基准采用黄海多年平均海面,验潮站是青岛大港验潮站,在其附近有“中华人民共和国水准原点”。1987年以前,我国采用“1956国家高程基准”,高程零点由1950—1956年青岛大港验潮站逐时平均海面

计算确定,水准原点的高程为 72.289m。1987 年后,我国启用“1985 国家高程基准”,它采用了青岛大港验潮站 1952—1979 年的资料,取 19 年的资料为一组,滑动步长为一年,得到 10 组以 19 年为一个周期的平均海面,然后取平均值确定了高程零点,水准原点高程为 72.260m。

高程基准的建设包括高程基准点和高程控制网的建立,而高程基准参考面则用(似)大地水准面表示。21 世纪初,利用已经建立的国家高精度 GPS A 级和 B 级网提供的 GPS 水准和 42 万实测重力点值,同时利用卫星测高数据,完成了中国新一代似大地水准面模型 CQG2000 的计算,覆盖了包括海域在内的我国全部领土范围,经内部和外部检核,总体精度达到了分米级水平。在我国海域,由于缺乏足够的实测重力数据,海域大地水准面主要根据卫星测高数据反演的重力异常来精化,并采用数据拟合方法将陆地大地水准面尽可能向海域延伸的方法实现拼接,该成果能满足国家基本比例尺(1:5 万)的测图要求。

近十年来,为满足大比例尺测图的需要,我国部分省区相继开展了厘米级似大地水准面精化工作,通过 GPS、水准、重力测量,并利用现有重力场资料,获取 $2.5' \times 2.5'$ 似大地水准面模型。国家测绘地理信息局组织完成了区域似大地水准面试点项目(浙江、福建、江西)确定的似大地水准面模型内符合精度为 5.5cm,外部检验精度为 6.2cm;华北地区大地水准面精化项目(北京、天津、河北、河南)确定的似大地水准面模型内符合精度为 4.1cm,外部检验精度为 5.2cm;华东华中区域大地水准面精化项目(上海、陕西、河南、安徽、山东、江苏、湖南、湖北)确定的似大地水准面模型内符合精度为 3.7cm,外部检验精度为 4.1cm;另外,广东、广西、海南、宁夏、青海、甘肃省份及自治区也相继完成了省级区域似大地水准面精化工作。精化后的区域似大地水准面模型可以满足大比例尺测图的需求,达到了用 GPS 技术代替低等级水准测量的目的。

1.2.3 深度基准现状

深度基准定义为计算水体深度的起算面,该起算面可以是某种特定条件下的水体层面,用深度基准面表示。特定条件可以是人为定义(内河或湖泊深度基准),也可以用模型表示(海洋深度基准)。深度基准面是一相对量,其垂向位置未知。深度基准只有与高程基准建立了联系,才可确定水体深度和水体底面地形之间的关系。

与大地水准面的定义相比,海洋深度基准(本文简称深度基准)的定义并不严格,其确定一般应遵循两个共同原则,一要保证航行安全,二要充分利用航道,因此深度基准面应定得合理,不宜过高或过低。由于各地潮汐性质不同,采用的计算方法不同,许多国家和地区的深度基准面也不相同。有的采用理论深度基准面,有的采用平均低潮面、平均低低潮面、最低低潮面、印度大潮低潮面、大潮平均低潮面等,还有的由于海区受潮汐影响不大而采用平均海面。

与大地水准面一样,深度基准面一旦定义,其表示应是明确和唯一的,这是测绘学特别是制图学的基本要求。

我国在 1956 年以前主要采用最低低潮面(印度大潮低潮面)、大潮平均低潮面和实测最低潮面等为深度基准面。1956 年起采用理论深度基准面,该面按前苏联弗拉基米尔方

法以 8~13 个分潮调和常数计算的当地理论最低地潮面。1980 年国家规定港口工程零点采用理论深度基准面。深度基准面用当地平均海面下的距离值表示,通常称为深度基准值 L 。

理论深度基准面的分布受潮差、气象和海洋形态(水深、地形、岸线形状)等因素的影响颇为明显,考虑不同因素计算得到的深度基准面会有所差异。目前,海军测绘部门采用弗拉基米尔方法加气象订正确定深度基准面,国家海洋局系统采用 BPF 法确定深度基准面;国家交通部 1987 年颁布的《港口工程技术规范》中规定,“我海区应尽量采用理论深度基准面”。这说明,在我国不同的部门采用不同的方法确定深度基准面,因此其计算结果是不尽相同的。另外,尚有专门为确定灯塔高和潮汐表中的潮高而设定的平均大潮高潮面和潮高基准面。

目前,深度基准面的实现只是验潮站相对于当地多年平均海面的数值形式,数据处理过程对该基准面未进行严格的标定与维持。历史数据和直接计算方法的差别,导致一些验潮站的深度基准面存在偏差。

由于缺乏实用的连续化海图深度基准模型,在陆海测量成果处理过程中,作业单位往往只是简单地根据水位控制的基本信息分析和比较滩涂区域陆海测量成果,无法有效实现两种观测手段成果的精确拼接。

美国等先进国家目前已基本实现了连续化深度基准面,我国也开展了前期论证研究工作,提出以长期平均海面作为基本海洋垂直基准的思想,讨论了现有基准定义的意义以及水深在椭球面基准、大地水准面基准、国家高程基准、平均海面基准、海图深度基准下的表示关系,给出了一种海洋测量深度的归算方案。此外,一些学者提出了理论深度基准的改进算法和模型,对中国沿岸主要验潮站海图深度基准面进行了计算和分析,结果表明中国沿岸不同验潮站海图深度基准面定义和算法存在较大差异。

1.2.4 重力基准现状

重力基准是标定一个国家或地区的(绝对)重力值和重力段差的标准。1957 年,我国在全国范围内建立了第一个国家重力控制网,它由 21 个基本点和 82 个一等点组成,称为 1957 年重力基本网。该网与前苏联的三个重力基本点联测,属波茨坦重力系统,后来发现该系统有 +14mGal 的常差。1985 国家重力基本网的建立从 1981 年开始,重力基本网包括 6 个基准点、46 个基本点和 5 个引点,共计 57 个基本重力点。2000 国家重力基本网始建于 1998 年,由 21 个基准点、126 个基本点和 112 个基本点引点,共计 259 个点组成。同时,还建立了 1 个国家重力长基线网,复测了国家重力仪格值标定场 6 处(计 60 个重力点),新建了国家重力短基线 2 处,以及附加联测了 1985 国家重力基本网、中国地壳运动观测网络重力网等重力点 66 个。2000 网重力点、短基线重力点和附加联测重力点共 389 点,重力平差值平均中误差为 $\pm 7.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。外部检核点(8 个)绝对重力值与平差值的不符值中误差为 $\pm 7.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。我国目前启用的重力基准为 2000 国家重力基本网。

1.2.5 海岛礁遥感识别定位与海岛测图

1.2.5.1 遥感识别定位

早期航海把经过的海区、岛屿和海岸的情况编结成各种航海图,对于潮汐、航线、航程、停泊港口和暗礁等通过目测等简单测量方法进行详细记载。传统的海岛礁定位技术需大量 GCP 和精确配准,海岛礁遥感识别定位还局限在利用 TM、ETM+、局部地区 SPOT5 等卫星资料、航空遥感资料的手工、目视解译海岛礁边界,粗定位海岛位置。

近年来,随着遥感科学技术的发展,采用航空航天遥感技术在海域岛礁识别定位中取得了一定进展,如采用高分辨率 IKONOS、Quickbird、CBERS-1 CCD 等光学卫星影像、结合 Radarsat-SAR、Geosat、ERS-1 等雷达卫星数据定位技术,以及高分辨率的航空摄影测量等遥感技术,实现了对岛礁、浅海水深调查和海底地形测量,并建立了完整的遥感岛礁和水深调查技术方法;国家海洋局第一海洋研究所应用 ETM+、SPOT5 等高分辨率光学遥感数据以及高分辨率 SAR 数据联合,对南海海域岛礁进行了细致的构象规律分析。利用 DGPS 与 INS 惯导系统,可以获得航空航天影像传感器的位置与姿态,实现定点摄影和无地面控制的高精度定位,对海岛礁精确观测和三维模型重建具有重要作用;将 DGPS、INS 和 LiDAR 集成,可实现无地面控制的海岛礁识别定位。还可以利用 GPS 定位技术进行岛陆联测,利用卫星轨道外推技术精确定位海岛。LiDAR 技术在海岛礁、滩涂测绘中亦有广泛应用。

1.2.5.2 海岛礁测图

海岛礁测图最早起源于航海所需的海图,海图以“海洋及其毗邻陆地的表面”为测绘对象,按一定的数学基础、特定的符号系统,以及综合取舍方法进行地物要素描述。随着海岛经济开发需要,人们开始侧重对海岛陆地部分进行全要素的基础地理信息测绘。海岛礁测图技术方法主要有摄影测量技术、LiDAR 技术以及 SAR 技术。自 1901 年荷兰人 Fourcade 发明了摄影测量的立体观测技术,经过近一百多年科学技术的发展,摄影测量立体测图一直是大面积获取地面三维数据最精确和最可靠的技术,并且是国家基本比例尺地形图测绘的重要技术,已经历了 20 世纪 30 年代到 70 年代的模拟摄影测量、50 年代末更新的解析摄影测量、80 年代开创的数字摄影测量时代,以及随着计算机进一步发展正逐步掀起的网络化、集群化、自动化全数字摄影测量时代,为海岛礁测图提供了很好的软硬件平台。但摄影测量技术也有其缺点,在森林、沙漠或者沿海滩涂地区,传统光学的影像纹理及对对比度比较弱,直接影响测图精度,甚至造成无法作业。

20 世纪 90 年代初机载激光雷达技术(LiDAR, Light Detection and Ranging)的出现,可在一定程度上弥补摄影测量技术在上述技术领域和区域的缺陷和不足,已初步应用于海岛滩涂测绘以及 DEM 等产品生产中,但处理技术方法和工程化应用能力还有待进一步提高。同样,应用到海岛礁测绘相关的技术还有从 20 世纪 60 年代中期由军用转为民用的合成孔径雷达技术(SAR, Synthetic Aperture Radar),SAR 影像能够全天候、全天时、高分辨率地获取水下地形和水深信息,该技术具有较强的水陆分界功能,在海岛礁岸线测绘方面取得一定进展,但因其对不同地物的成像特点各异,再加上影像地物难以辨别、噪声比较严重等缺点,在海岛测图中鲜有应用。

1.3 海岛礁测量技术

1.3.1 海岛礁坐标基准建立

海岛礁坐标基准可分为与大陆一致的海岛礁坐标基准和海岛礁独立坐标基准两种。前者是通过将大陆大地控制网向海岛礁延伸,通过数据处理建立与大陆一致的海岛礁坐标基准,以保证大陆测绘成果与海岛礁测绘成果的一致性。海岛礁独立坐标基准一般是受限于历史条件或技术条件,无法实现大陆坐标基准向海岛礁传递,而引入的一种地方独立坐标基准。

随着空间大地测量技术的出现和成熟,参心坐标系统正被地心坐标系统所取代。目前,可使用 GNSS 定位技术,通过获取某一地区 3 个或 3 个以上大地控制点的站坐标集,建立地心坐标系统。与大陆一致的海岛礁坐标基准是大陆坐标基准向海域的延伸,建立与陆地一致的海岛礁坐标基准需要在现行大地坐标系统定义及其参考框架的基础上,通过在海岛礁上布测大地控制网,经数据处理得到这些大地控制点在现行大地坐标系下的点位坐标,为维持该坐标基准,还需对这些大地控制点附加速度场信息。

建立与大陆一致的海岛礁地心坐标基准,可基于全球 ITRF 框架或区域 CORS 参考框架,在大陆沿岸及海岛上加密 CORS 站,在此基础上,进一步布测大地控制网,通过 GNSS 定位数据处理与分析,最终得到这些大地坐标框架点在现行大地坐标系下的三维坐标。在选取周边或全球 ITRF 框架下具有精确站坐标和速度场的基准站时,利用测站的速度场模型进行历元归算后,通过对这些站施加强约束,与区域 CORS 站、海岛 CORS 站及海岛礁 GNSS 观测数据特定参考历元进行最小二乘估计,获得海岛礁大地控制网点在该参考历元的坐标集。

在海岛礁坐标基准建立早期,无法使用 GNSS 连续观测数据估计坐标框架点的速度场,可采用板块运动模型实现海岛礁坐标基准的维持。随着海岛礁 CORS 站连续观测和大地控制网复测的逐步开展,可利用 GNSS 观测资料分析建立坐标框架点的速度场模型,对海岛礁坐标基准进行维持。

1.3.2 海岛礁垂直基准构建

海岛礁垂直基准建立的基本方法是确定垂直基准参考面。垂直基准一般包括高程基准和深度基准,高程基准参考面为似大地水准面,主要采用物理大地测量方法,联合多源重力场探测数据按重力场边值方法计算;深度基准参考面为深度基准面,相对于平均海面的高度(称为深度基准值)由海潮模型(潮汐调和常数)按公式计算,其中海潮模型可通过同化验潮站、卫星测高调和参数与潮波流体动力学方程来建立。

以平均海面为中介面,确定平均海面大地高(称为平均海面高)和海面地形(即平均海面的正常高)数值模型,实现深度基准面的垂向定位,从而得到高程基准与深度基准之间的转换模型。通过长期验潮站和 CORS 站并置技术,建立高程和深度基准之间及其与大地坐标框架的严密关系。