



地球信息科学基础丛书

Geo-information Science

基于电子海图的航线自动生成 理论与方法

张立华 著



科学出版社

基于电子海图的航线自动生成 理论与方法

张立华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从高安全性、高经济性的舰船航行出发,系统地阐述了基于电子海图的舰船航线自动生成理论与方法,主要包括:电子海图平台下舰船航线自动生成的意义及现状,基于电子海图信息的碍航区自动提取,基于电子海图的最短距离航线自动生成,海洋动态环境信息建模及碍航区动态提取,基于瞬时水深模型的航线可行性分析,基于瞬时水深模型的最短时间航线自动生成方法。本书展示了基于电子海图的航线自动生成这一方面的新成果及其应用前景。

本书可供海洋地理信息系统、航海和海洋等领域的科技人员及高等院校有关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于电子海图的航线自动生成理论与方法/张立华著. —北京:科学出版社, 2011

(地球信息科学基础丛书)

ISBN 978-7-03-030277-9

I. ①基… II. ①张… III. ①航海图-数字化制图-研究 IV. ①U675.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 022469 号

责任编辑:韩 鹏 朱海燕 赵 冰 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2011年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年3月第一次印刷 印张:12 1/4

印数:1-2 000 字数:284 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着世界经济全球化的发展,我国的国内物流和对外贸易量迅速增长,海运事业进入了空前的发展时期,安全、经济的海上航行变得日益重要。船舶运营公司要想在日益激烈的市场竞争中立于不败之地,就必须考虑既经济又安全的高质量航线;而在海上避难、搜救等应急行动中,则希望快速地拟定出航行时间最短的航线;在军事上,面对复杂多变的航行环境,如果能自动、快速地找到一条很合理、非常有效的航线,则可赢得战机,为战争胜利创造条件。因此,快速有效的高质量航线设计,在民事活动和军事应用上都具有重要意义。

在海图的应用中,舰船导航是最重要的方向,而航线设计又是舰船导航决策中的基础性内容。随着电子海图与显示系统(ECDIS)的出现,人们开始探索其在航线分析及设计中的应用。如何将地理信息系统(GIS)的空间分析功能融入电子海图中,实现航线的优化设计,引起了国内外众多学者的关注,并在航行距离(或时间)最短等问题上开展了较多的研究。相对于传统手工作业来说,目前的航线优化设计方法在设计质量、效率和自动化程度等方面均有不同程度的提高,但仍只分析了较为理想、简单的情形,未有效考虑海洋动态信息的影响,难以实现航线的完全自动生成。同时,由于航线优化设计及自动生成技术综合性强,相关知识涉及测绘、航海、海洋等多个学科领域,现有的技术方法尚未形成很系统的理论,缺少全面的分析和总结。上述现状在很大程度上限制了电子海图平台下航线自动生成理论与技术的发展及应用,影响了人们对航线生成中关键技术问题的理解和把握。为此,本书将基于电子海图,对航线自动生成技术进行更全面、更深入的分析 and 研究。

本书是在作者博士后工作内容和博士论文研究的基础上完成的,同时还包括作者及研究小组近年来的一些研究成果,另外,兼顾本书知识的系统性,也引入了国内外同行的一些相关研究成果。本书面向高安全性、高经济性的舰船导航,主要研究了基于电子海图的最短距离航线自动生成方法,并将与舰船航行相关的海洋动态信息进一步融入电子海图平台,探索了基于动态电子海图的航线可行性分析以及最短时间航线自动生成方法。全书共分为8章,第1章主要分析了电子海图平台下舰船航线自动生成的意义,总结了国内外舰船航线优化和自动生成的现状及发展趋势。第2章简述了电子海图的基本概念及ECDIS的基本组成,剖析了矢量电子海图的基本数据结构,介绍了专用电子海图显示系统的研制。第3章介绍了航线设计的基本概念,剖析了航线可行性自动评判的依据及方法,介绍了迷宫改进方法、航线网格方法、气象定线方法及动态网格方法等常用的航线优化设计方法的基本原理。第4章提出了基于海图水深的三角网自动构建及等

深线快速追踪方法,解决了等深线绘制中的多义性问题,最终实现了基于电子海图的碍航区的自动提取。第5章研究了基于电子海图的最短距离航线自动生成,提出了航路二叉树、网格点动态规划等具体的实现方法,探索了可操作性条件限制下的航线评估与航线的多尺度生成。第6章分析了海洋动态要素对舰船航行的影响,研究了海洋动态环境模型的构建,实现了碍航区的动态提取。第7章研究了基于瞬时水深模型的航线可行性分析方法,提出了基于瞬时水深模型的最短时间航线自动生成方法,探索了多动态要素复合条件下的最短时间航线生成。第8章对航线自动生成中的技术和方法进行了总结,对下一步需要解决的技术问题进行了展望。

本书内容的研究直接得到了国家高技术研究发展计划项目(2009AA12Z202)、国家自然科学基金项目(40801189)、测绘遥感信息工程国家重点实验室基金[WKL(05)0304]、地理空间信息工程国家测绘局重点实验室经费资助项目(200634)和海军大连舰艇学院科研发展基金资助项目(FZ0402512)的资助,非常感谢他们对作者的信任及对本书研究内容的支持。

本书的大部分内容是作者在武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室攻读博士学位及在中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室从事博士后研究期间完成的。在本书即将完成之际,首先感谢朱庆教授和周成虎研究员、苏奋振研究员对作者在博士学习和博士后工作期间的指导,本书的研究工作和个人的进步无不得益于几位老师的指导和帮助。感谢武汉大学的杜道生教授、詹庆明教授、吴华意教授,北京大学秦其明教授、中国科学院地理科学与资源研究所杨晓梅研究员、国家海洋局海洋应用中心王其茂高级工程师、中国交通信息中心孙腾达高级工程师对本书的内容研究提出了很多有益的建议。在本书的写作和有关科研项目研究过程中,得到了海军海洋测绘研究所翟京生高级工程师、翟国君高级工程师、黄漠涛高级工程师、欧阳永忠高级工程师等的指导和帮助,天津海事局的张安民高级工程师也提出了相关的建设性意见。感谢海军大连舰艇学院海洋测绘科学与工程系的彭认灿教授、殷晓冬教授及全体同志,他们在日常工作中对作者的支持是能顺利完成本书内容研究及写作的坚实保障。感谢海军大连舰艇学院暴景阳教授、赵军方讲师、许军讲师、唐岩博士为本书实验所提供的海洋动态信息数学模型,感谢张莉工程师、吴理达、汪柱、周绍炜、曹鸿博、贾帅东等研究生为本书部分实验及插图制作所提供的帮助,感谢中国人民解放军信息工程大学武芳教授和中国科学院地理科学与资源研究所苏奋振研究员对书稿的审阅。

本书的研究虽然只是一个开始,但作者相信可为今后的研究奠定一个较好的基础。同时作者也希望通过本书的出版,能够抛砖引玉,使更多的专家、同行和学者关注该领域的研究,进一步推动测绘、航海和海洋领域的交叉融合。由于基于电子海图的舰船航线自动生成是一门涉及多学科的综合性技术,并且处于快速发展之中,加之作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2010年11月于大连

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 舰船航线设计的基本概念	1
1.2 舰船航线优化设计的意义	1
1.3 舰船航线优化设计的国内外研究现状	3
1.4 舰船航线设计的学科隶属关系	5
第 2 章 电子海图	7
2.1 电子海图的基本概念	7
2.1.1 海图及投影	7
2.1.2 电子海图	7
2.2 ECDIS 的组成	9
2.2.1 ECDIS 的硬件	10
2.2.2 ECDIS 的软件	12
2.2.3 ECDIS 的数据	14
2.3 电子海图的发展.....	15
2.3.1 电子海图的发展概况	15
2.3.2 电子海图的发展趋势	18
2.4 矢量电子海图数据.....	19
2.4.1 矢量海图的空间基准	19
2.4.2 VCF 数据组织	20
2.5 专用电子海图显示系统.....	24
2.5.1 基本数据结构	24
2.5.2 专用海图显示系统	28
第 3 章 舰船航线设计理论	30
3.1 航线的种类及设计.....	30
3.1.1 航线的种类	30
3.1.2 航线设计的要求	31
3.1.3 航线设计的作业方式	32
3.2 航线可行性判断方法.....	33

3.2.1	航线可行性自动评判依据	32
3.2.2	航线可行性自动判断方法	33
3.3	航线优化设计的常用方法	36
3.3.1	迷宫改进方法	36
3.3.2	航线网络方法	37
3.3.3	气象定线方法	41
3.3.4	动态网格方法	44
第4章	基于电子海图的碍航区自动提取	50
4.1	基于海图水深的三角网构建	50
4.1.1	水深三角网的快速构建算法	50
4.1.2	基于采样点限制的三角网构建	53
4.2	基于三角形拓扑关系的等深线快速追踪	56
4.2.1	传统等值点追踪算法	56
4.2.2	基于三角网拓扑关系的等值点追踪算法	57
4.2.3	实例分析	59
4.3	等深线绘制中的多义性问题处理方法	60
4.3.1	等深线绘制中的多义性问题对水深区域表达的影响	60
4.3.2	浅点约束方法	61
4.3.3	实例分析	61
4.4	碍航区的自动提取	62
4.4.1	安全等深线追踪	62
4.4.2	浅水碍航区提取	64
4.4.3	碍航区的确定	66
4.4.4	碍航区的合并	67
第5章	基于电子海图的航线自动生成方法	73
5.1	基于方位相差最小的航线自动生成方法	73
5.1.1	可航行航线的测试与自动搜索	73
5.1.2	航线的优化与动态调整	74
5.1.3	实例分析	74
5.2	基于航路二叉树的航线自动生成方法	76
5.2.1	航路二叉树	77
5.2.2	基于航路二叉树的航线自动生成	78
5.2.3	实例分析	82
5.3	基于网格点动态规划的航线自动生成方法	83
5.3.1	网格点计算	84

5.3.2	可行性航段判断	85
5.3.3	最短路径搜索	85
5.3.4	冗余节点处理	86
5.3.5	实例分析	86
5.4	最短距离航线自动生成改进方法	87
5.4.1	平面线段与碍航区多边形的关系	88
5.4.2	关键步骤	88
5.4.3	主要改进处理措施	93
5.4.4	实例分析	97
5.5	基于附加条件约束的航线自动生成	98
5.5.1	可操作性限制条件	98
5.5.2	推荐航线约束	99
5.5.3	军事约束	100
5.6	基于可操作性限制条件综合评判的航线自动生成	103
5.6.1	可操作性综合评判航线的基本概念	103
5.6.2	可操作性限制条件综合评判指标构建	104
5.6.3	实例分析	108
5.7	电子海图航线的多尺度自动生成	109
5.7.1	细节分层技术	110
5.7.2	电子海图的多尺度组织	111
5.7.3	海图航线多尺度生成的关键技术	112
5.7.4	航线的多尺度生成及分析	116
第 6 章	舰船航行相关的海洋动态要素建模	119
6.1	基于网格潮汐场模型与海图数据的瞬时水深模型构建方法	120
6.1.1	网格潮汐场模型	121
6.1.2	高效融合策略	124
6.1.3	实例分析	126
6.2	大型航路的瞬时水位预报方法	129
6.2.1	网格潮汐场模型的构建	129
6.2.2	水深点处天文潮位的预报	130
6.2.3	基于余水位内插的水位精化	131
6.2.4	预报水位的快速生成策略及应用	131
6.2.5	实例分析	132
6.3	高精度瞬时水深模型的构建	133
6.3.1	传统的瞬时水深模型	134

6.3.2	高精度瞬时水深模型构建	136
6.3.3	比对分析	137
6.4	海洋动态环境信息中的风流浪模型	141
6.4.1	海流模型构建	141
6.4.2	风浪模型构建	145
6.5	基于动态信息的碍航区自动提取及表达	151
6.5.1	浅水碍航区的动态提取	151
6.5.2	复合条件下的碍航区表达	152
第7章	基于动态电子海图的舰船航线分析技术	157
7.1	基于瞬时水深模型的航行可行性分析判断方法	157
7.1.1	航线可行性分析数学模型	157
7.1.2	航线可行性分析计算方法	158
7.1.3	实例分析	160
7.2	基于瞬时水深模型的大型舰船乘潮进港分析方法	162
7.2.1	基于多波束数据的瞬时水深模型的构建	162
7.2.2	航线可行性测试	164
7.2.3	实例分析	165
7.3	基于瞬时水深模型的最短时间航线自动生成方法	167
7.3.1	基于瞬时水深模型的碍航区提取及航线可行性分析	167
7.3.2	最短时间路径搜索及优化	168
7.3.3	实例分析	170
7.4	多动态要素复合条件下的最短时间航线生成方法	174
7.4.1	复合条件下多动态要素对航线的影响机制	174
7.4.2	最短时间航线计算方法上的改进策略	176
7.4.3	实例分析	177
第8章	航线自动生成的发展方向及展望	178
8.1	航线自动生成的发展方向	178
8.1.1	高安全性的需求	178
8.1.2	高经济性的需求	178
8.2	航线自动生成面临的挑战	178
8.2.1	理论技术上的挑战	178
8.2.2	实际应用上的挑战	179
8.3	需要进一步突破的关键技术问题	179
8.3.1	高精度的静态水深模型	179
8.3.2	准确的动态信息	179

8.3.3 更有效的航线分析算法 180

8.3.4 特殊影响因素的分析 180

8.4 结束语 180

主要参考文献..... 181

第 1 章 绪 论

1.1 舰船航线设计的基本概念

舰船航线是指舰船从某一地点驶抵另一地点的海上航行路线。航线通常又有计划航线和实际航线之分，计划航线是指根据航行目的预先设计的计划航行路线；实际航线是指舰船在航行过程中实际经过的路线。

计划航线设计是航行计划的重要组成部分，是航行计划的具体实现。航线设计的原则是安全和经济。安全和经济是统一的，目的是提高经济效益。不安全的经济航线绝对不可取，而不经济的安全航线也是得不偿失的，在安全的前提下达到经济，经济必须安全（郭禹，2005）。在航线设计中，为了保证安全和经济，需要根据查阅的航海图书资料和本船（或他船）的具体航行经验，结合本船的船型、吃水、性能、定位条件、船员素质和航线的气象条件等因素，反复推敲，确定计划航线。航线设计是一项比较复杂和细致的工作，涉及知识面广，选择性和多变性强。舰船在海上航行，与陆地上汽车和火车沿固定路线行驶是大不一样的。由于海区广、活动余地大、气象条件多变，各种舰船情况不同，选择航线上就各有千秋。但如何在海上两点之间自动生成一条合理的舰船计划航线，成为我们关注的重点，也正是本书所要讨论的核心问题。

1.2 舰船航线优化设计的意义

随着世界经济全球化的发展，我国的国内物流和对外贸易量迅速增长，沿海港口吞吐量逐年高速上升，承担着 85% 左右外贸货物运输的海运事业进入了空前的发展时期。民用船只的航线通常预先设计，经多次试航后基本固定（叶清和郁振伟，2003），但船舶运营公司要想在日益激烈的市场竞争中立于不败之地，就必须考虑既经济又安全的高质量航线（叶清和郁振伟，2003；Chinmaya et al., 2008；Christiansen et al., 2004；Vlachos, 2004；王德春等，2005）。而在海上避难、搜救等应急行动中，则希望快速地拟定出航行时间最短的航线（Hajime et al., 2002；Theunissen et al., 2004）。在军事上，海上航行更具特殊性，它要求航海人员在各种复杂因素的前提下，制定出合理的航行路线，以便准确、安全、隐蔽、及时地完成上级交给的航行任务（Anel, 2005；Bekker and Schmid, 2006；王科，2004）。军事行动的高速度、高效率要求军事决策具有很高的准确性和实时性。因此，进行快速、有效的舰船航线设计，已成为现代航海中

至关重要的环节。

长期以来,航线设计是根据任务需求,在舰(船、艇)长指导下,由航海长(二副)查阅航行资料,在纸质或电子海图上,根据个人经验,手工拟定计划航线,以确保舰船沿着计划航线安全、经济地航行到目的地。近 10 多年来,电子海图显示及信息系统(ECDIS)得到了较为广泛的应用。它在电子海图的基础上,将导航信息、海图信息、雷达信息等集成在一起进行处理和显示,已经实现了舰船定位、航行计划、避碰、航迹保持等功能,但电子海图的主要功能还是用于显示水深及与舰船航行相关的信息上,并未有效挖掘其在航线自动分析及决策方面的潜在功能。目前 ECDIS 中的航线设计基本上还是由航海人员人工判读海图内容,评估图上要素的位置,做出相应的分析决策。采用这种人工作业的方法,有时会由于海图比例尺过小而使碍航物等海图信息表达不准确,从而导致航行中的信息判断失误,可能酿成不良后果。另外,由于手工操作工作强度大,并且航线设计结果的优劣完全取决于航海人员的经验、作业熟练程度及工作态度,这往往会给航行带来很多潜在的不安全因素。当然,ECDIS 经过多年的发展,大部分产品已经具有一定的辅助航线设计能力,即在用户自己确定航路点的情况下,可在电子海图上由计算机自动检索计划航线是否穿过禁航区及浅滩、岛礁等区域(党莹,2006;李源惠等,2000)。与此同时,在电子海图上如何对航线进行优化设计,也引起了国内外学者的关注(Anel,2005;李源惠等,2007;王科,2004;张立华等,2007b)。如果在此基础上进一步挖掘 ECDIS 的决策分析功能,改进现有的技术方法,在海图上自动生成最优化航线,则可大大降低航海作业人员的工作强度,提高航线设计的效率和质量,增强航行的安全性和经济性。

另一方面,舰船航行在动态的海洋环境中,水深受潮汐等影响在不断地变化,这种变化在我国一些海区可达数米,成为影响舰船航行(尤其在邻近安全水深的海区)的重要因素;同时,动态变化的风和海流也将会使舰船偏离预定的航线,影响预期的航行计划;另外,海浪也可能会引起舰船失速,甚至颠覆。因此,有效地组织和表达舰船航行的海洋动态环境要素,并使之服务于舰船航行决策,是海上高安全性、高经济性航行的基础。而目前舰船航行采用静态的海图,这种海图水深表达的是从理论深度基准面起算的一种稳态深度,并不能反映瞬时海水深度的实时变化。在舰船导航中,对于潮汐引起的水位变化,在主要港口尽管可以通过纸质表格来查阅,但通常只有高低潮时资料;在主要港口以外的地点,通常只能采用邻近港口的资料来进行推算,甚至只能凭航海人员进行经验估计(Pillich and Schack,2002;王科,2004)。这种作业方法存在信息分析处理效率低、海上动态环境表达不够及时准确、航海作业水平受制于人员业务能力及工作态度等弊端(张立华等,2007b;张立华,2007;张立华,2009)。

因此,基于电子海图平台,高效组织和表达舰船航行环境,改进现有的舰船航线优化设计技术,探索最短航线自动生成理论与方法,具有现实意义。

1.3 舰船航线优化设计的国内外研究现状

为了提高航线设计质量,提高航行安全度,在选择航线时,一般主要依靠中、英版航海资料中给出的推荐航线。除此之外,也可以通过阅读大量的相关航海图书资料,对航线的全貌有一个深入的了解和掌握,从中选出适合本船条件和航行季节水文、气象条件要求的安全、经济航线。另外,可以通过大量丰富的实航经验的积累,逐步掌握某些航线的规律,从而选择更为合理的航线(郭禹,2005;刘英贤,2002)。在军事上,作战航线还得考虑敌我兵力分布,避开敌方兵力侦察、攻击,取得己方兵力掩护等要求(芮震峰,2005)。

但面对很多非定期的临时性任务,有时是难以采用推荐航线或根据以前的经验来优化航线的,特别在海上避难、搜救和军事等应急行动中,更需要快速选择能完成紧急任务的优化航线。

随着 ECDIS 的出现,人们开始探索其在航线分析设计中的应用。如何将地理信息系统(GIS)的空间分析功能融入电子海图中,实现航线的优化设计及自动生成,已引起了国内外众多学者的关注。从最初的计划航线可行性判别发展到后来的航线优化设计,以及现在的航线自动生成(李源惠等,2000;李勇等,2007;Christiansen et al., 2004;熊文海和邹涛,2007;Ray et al., 2007;Vatsal and Kumar, 2003)。

综合国内外的主要文献资料,将典型的航线优化设计方法归纳总结如下。

(1) 基于栅格海图的迷宫改进方法。Chang 等(2003)在栅格电子海图平台下,改进迷宫算法,就如何避开碍航区,研究了最短距离航线的问题,Rafal(2006)则进一步分析了转向和避碰容差条件,对航线进行了再优化。但这类方法只适用于并不常用的栅格电子海图,而且只对较为简单的情形进行了研究,也没有考虑海洋动态要素对舰船航行的影响。

(2) 基于已知航路点库的航线网络方法。这类方法借鉴陆地上交通网络分析的思想,求取最短距离航线。叶清和郁振伟基于多个港口形成的交通运输网,改进了传统的 Dijkstra 算法,研究了海图上最短航线的选择问题(叶清和郁振伟,2003)。王德春等应用 A* 算法,进行了最短路径的研究(王德春等,2005)。王科和 Anel 基于 Dijkstra 算法,对军事航线的最优化问题进行了研究(王科,2004;Anel, 2005)。但航线网络方法需要以一个已知的航路点库为基础(王科,2004),而实际航行中并不一定任何海区都事先建有这样一个合理的航路点库。更重要的是,海上航行与陆地上有所不同,陆地上的道路网是固定的,火车、汽车也只能沿着这些道路行驶,但海上的舰船,只要水深足够的地方,就可以航行。所以,利用这种方法所得的最短距离只是针对已知航路点库的最短,而可能并非实际中的最短。同时,这种最短距离航线也没有考虑动态要素的影响。

(3) 远洋航行中的气象定线方法。其核心是分析水文气象条件，采用计算等时线等技术手段，优选船舶航线（李远林和陈宏彬，1997；王凤武和贾传荧，1998；Bijlsma，2004；Chinmaya et al.，2008；Vlachos，2004）。还有学者进一步将模糊综合评判方法应用于远洋航线的优选（党莹，2006）。公开的文献显示，这种方法专门针对远洋航行，分析了潮流、风浪等信息的影响，研究了航行时间最短的问题。但这种方法没有分析碍航物较多、海区条件相对复杂的沿岸区域。同时，也没有考虑水位变化对最短时间航线的影响。

(4) 自动生成方法。李源惠等（2007）将矢量电子海图均分成方格并判断相邻方格间的连通性，然后采用 Dijkstra 算法、路线接近对角线原则对航线进行优化，实现了质量依赖于方格大小的航线自动生成。这种自动生成方法在航线质量和自动化作业程度上都有了很大的提高，但过程较为复杂，也只考虑了海图距离最短这一指标，没有考虑海洋动态信息对航线生成的影响。

总的来说，航线最优化问题已成为海图应用中的一个研究热点，国内外的研究都主要集中在航行距离（或时间）最短上。相对于传统的手工作业方法来说，现有的各种最短航线优化方法在设计质量、效率和自动化程度等方面均有不同程度的提高，具体性能对比如表 1-1 所示。

表 1-1 不同航线优化方法性能对比

方法	迷宫改进算法	气象定线方法	航线网络方法	自动生成方法
研究平台	栅格电子海图	纸质海图 或矢量电子海图	纸质海图 或矢量电子海图	矢量电子海图
分析指标	距离最短	时间最短	距离最短	距离最短
适用范围	不复杂情形	远海区域	简单情形	不复杂情形
优化质量	依赖剖分方格大小	依赖测试线间隔	依赖航路点库	依赖剖分方格大小 或海图上的最优
自动化程度	计算机作业	计算机（或辅助） 作业	计算机（或辅助） 作业	计算机作业
动态信息	未考虑	仅考虑潮流、气象	未考虑	未考虑

从目前公开的文献来看，现有最短航线方法主要还是针对较为理想的情形进行了分析，适用范围有限；更重要的是，未有效考虑海洋动态信息的影响，而实际航行中，这种影响对舰船航行来说可能是不能忽视的。如果能利用这种海洋信息的动态变化，则可使某些无法进港的超大型船舶能顺利地进、出港，可使舰船在应急航行中穿越某些浅水区，大幅度节省时间，从而可在军事上为舰船开辟新航线，达到出奇制胜的效果。

近年来，随着海洋地理信息系统的研究从静态进入动态，基于动态 ECDIS 的舰船导航也正成为一个新热点（Gold et al.，2004；Goralski and Gold，2007；Johnson，2005；Smith，2003）。2003 年，美国 New Hampshire 大学海洋制图和海道测量中心启

动一项“Chart of the Future”工程 (Arsenault et al., 2003)。工程的长远目标是要尽可能将实时的水位等动态信息融入未来的海图 (Brennan et al., 2003, 2007)。美海军也计划将水位等动态信息融合到海军导航系统中, 准备在未来的军用电子海图上增加动态变量, 实现动态导航 (Edward, 2001; Gillard and Heim, 2002)。2006 年, Mahmud 等 (2006) 尝试了在海图水深上加入实时变化的水位, 以蓝色水深表达可航行水域。2007 年, Brennan 等 (2007) 披露了正在进行的示范工程, 准备将实时的水位变化融入海图, 实现动态导航。2008 年 3 月, 国际海道测量组织 (IHO) 官方网站正式公布了 S-100 草案, 以行业标准的形式明确了动态水位在未来舰船航行环境中的组织及应用 (Lee et al., 2008)。因此, 基于海洋动态信息的舰船导航决策分析将是海洋 GIS 应用的一个必然发展趋势。要实现基于海洋动态 GIS 技术的舰船导航决策分析, 首先需要准确地预报和监测舰船航行环境的动态变化, 并将这种变化高效融入电子海图。近年来, 作者和一些国外学者曾做了这方面的探索, 但都只采用了很粗略的潮汐模型, 对较小的示范区域进行了尝试 (Brennan et al., 2007; Mahmud et al., 2006)。如何构建高精度的水位预报模型并将预报水位高效融入传统的静态水深, 同时, 进一步考虑潮流、海浪等其他动态信息的影响并应用于航线规划, 是未来舰船导航决策分析需要探索的问题。

总之, 国内外公开的资料显示, 基于电子海图的舰船航线优化设计已引起了电子海图生产和应用者的关注, 但真正实现最短距离 (或时间) 航线的自动生成, 还有一些技术问题亟待解决。更重要的是, 将海洋动态信息应用于舰船航线分析, 将成为未来发展的一个新方向 (Arsenault et al., 2003; Brennan et al., 2007; Mahmud et al., 2006)。尽管个别学者对动态分析算法也有过探索性研究, 但考虑的要素不全, 未专门考虑海区条件较复杂的沿岸海区。如何准确地表达海洋动态信息, 并有效地将其融入电子海图平台, 科学服务于舰船航线分析, 在国内外还鲜有具体的文献报道。

1.4 舰船航线设计的学科隶属关系

在海图的应用中, 舰船导航是最重要的方向, 而航线设计是导航决策分析中的基础性内容。这样, 就决定了航线设计与多个学科紧密相连。从传统的航海作业实施来说, 航线设计由航海人员完成, 可以说航线设计是航海学的内容, 隶属于交通信息工程学科。但航线优化设计是在海图上进行的, 航线优化设计及自动生成技术的发展是与电子海图的发展密不可分的。随着电子海图技术的不断发展, 航线优化设计已逐渐成为 EC-DIS 的基本决策分析功能。电子海图的制作生产是海洋 GIS 的内容, 隶属于测绘科学与技术学科。从技术层面来说, 航线设计可以说是 GIS 技术在航海上的应用, 也可以说是海洋交通 GIS 的内容。所以说, 舰船航线设计是海洋 GIS 技术与航海技术的结合体。国际上, 对应于航海和海洋测绘两个专业, 各有一个对应的国际组织, 分别是国际海事

组织（IMO）和国际海道测量组织（IHO）。随着动态 ECDIS 概念的提出，海洋动态信息对舰船航行的影响日益受到重视，而风、潮汐、潮流、海浪这些动态信息的分析及模型构建又涉及海洋学、气象学的内容。所以说，舰船航线设计是一个多学科交叉的研究领域，舰船航线自动生成技术的发展必将推动这些学科之间的进一步交叉融合，促进相关技术的协调发展。

当前，运用现代信息技术，对海上航行进行高安全性、高经济性导航，在世界范围内正积极从规划、示范阶段向基本建设阶段发展（Pillich, 2007; Lee, 2009）。不仅世界上传统的海洋 GIS 和交通航运研发机构，而且船舶工业、海事管理、渔业水产等部门和机构也纷纷参与进来，对电子海图及航线设计寄予了较多的关注。随着相关技术的不断成熟及应用，航线的优化设计及自动生成会促进相关学科交叉内容的丰富，带来新的技术生长点，对发展我国的交通航运、海图生产等产业都具有重要的意义，而且还会对海上军事行动产生深远的影响。

第2章 电子海图

2.1 电子海图的基本概念

2.1.1 海图及投影

海图是以海洋及其毗邻的陆地为描述对象的地图，是为航海需要而专门绘制的一种地图。海图上详细地绘画了航海所需要的资料，如岸形、岛屿、礁石、浅滩、沉船、水深、底质和水流资料等。海图是航海的重要工具之一。在航行前拟定计划航线、制订航行计划、航行中进行航迹推算以及航行事后总结分析都离不开海图（郭禹，2005）。

为了在平面上描绘地球，需要采用地图投影。同样，为了在海图上表达海洋目标，进行航行作业，也需要进行海图投影。海图投影多采用墨卡托投影，墨卡托投影的主要特点是：

（1）图上经线为南北向相互平行的直线，纬线为东西向相互平行的直线，且经线与纬线相互垂直；

（2）图上经度 $1'$ 的长度相等，但纬度 $1'$ 的长度随纬度升高而逐渐变长，存在纬度渐长现象；

（3）恒向线在图上为直线；

（4）具有等角特性，在图上所量取的物标方位角与地面对应角相等；

（5）图上同纬度纬线的局部比例相等，不同纬度的局部比例尺，随纬度的升高而增大。

对于大洋航行，也可采用大圆海图，是根据日晷投影原理绘制的，将地球表面的点以几何投影的方法，用从地心引出的射线投影到与地面相切的平面上。

对于大比例尺港湾图，还采用高斯投影，或是其他基本没有投影变形的平面图或日晷投影。

2.1.2 电子海图

我们通常所指的“电子海图”是一个很模糊的概念，一般把各种数字形式的海图及其应用系统统称为电子海图（汪柱，2009）。电子海图的概念通常也有广义和狭义之分（彭认灿，2009）。广义的电子海图是对所有有关电子海图的生产或应用、软件或硬件的