

基于动态通达网络模型的最优航程规划方法

汤青慧¹ 唐旭² 崔晓晖^{3,4} 胡石元² 刘耀林²

1 青岛理工大学管理学院, 山东 青岛, 266520

2 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉, 430079

3 武汉大学国际软件学院, 湖北 武汉, 430079

4 纽约理工学院工程与计算机科学系, 美国 纽约, 11360

摘要:受局部天气和海况变化影响的航线网络具有动态通达特征, 远洋船舶需据此进行计划航线的修正。基于动态通达网络模型, 设计了一种最优航程规划方法。首先, 在港口和已知航线构建的静态网络基础上, 通过叠加由风暴等极端气候形成的移动碍航区和由海洋地形或军事管制等形成的静态碍航区, 构建分段航线包含禁航时序信息的动态通达网络模型; 其次, 在航线通达、续航可行和航线最短等准则约束下, 按照“优度递减”策略设计了包含计划航线通达分析(续航决策)、最短绕行航线搜索(改航决策)、最佳停靠邻港搜索(停靠决策)等步骤的最优航程规划技术路线, 并对局部航线改变绕行、航线通达判断、最短绕行航线搜索和最佳停靠邻港搜索等关键算法进行了阐述; 最后通过模拟数据对算法可行性和有效性进行了验证, 对远洋船只航行决策和海洋指挥救援具有重要的应用意义。

关键词:航线规划; 动态通达网络; 最优决策; 网络分析; 最短路径

中图法分类号: P208; TP301 文献标志码: A

目前, 每年约 70 亿吨的货物(约占全球贸易总量的 90%)通过海洋运输, 船舶租金和燃料等成本每天累积成千上万美元^[1], 航线安全和高效的重要性不言而喻。从文献^[2-5]可以看出, 航程规划一直是近 20 年来海洋运输的研究热点。

根据环境信息和船舶状况, 航程规划可分为静态规划和动态规划两类^[6]。静态规划主要是基于已知的海域港口、地形和水深等信息, 以避免静态碍航物与实现最短航线设计为目标。典型算法包括基于网格数据的邻域二分查找方法^[7]、惩罚算法^[8]、迷宫算法^[9], 基于矢量数据和空间几何解析^[10]的航路二叉树^[11]及递归改进搜索算法^[12]、遗传算法^[13], 基于已知经验航线网络的 A* 算法^[14]、Dijkstra 算法^[15]等。环境不变性是静态规划的前提假设, 故前述研究仅限于起航前的计划航线搜索及优化。动态规划则需要考虑水文气象、突发事件等环境综合因素进行最优航线设计。但综合分析动态规划相关的随机动态网络规划方法^[16]、船舶失速数值方法^[17]以及基于滚动时域的启发式遗传搜索算法^[18]等典型方法可知, 环境因

素及其动态变化产生的碍航特征并未得到系统分析, 且实际航行中对计划航线进行动态修正和决策的场景研究也较少见。

安全性、可达性和经济性是航程计划制定时需要综合考虑的要素。本文通过将经验航线与海域实时动态环境信息叠加, 构建包含时序禁航信息的动态通达网络模型, 在此基础上考虑航速、油耗等船舶航行能力约束, 按照“优度递减”的策略设计一种海域环境变化情景下的最优航程动态规划方法, 为航船舶的续航、改航和停靠等后续航程计划的制定提供决策支持。

1 动态通达网络模型

1.1 动态通达网络定义

动态通达网络是在由港口集、经验航线集构建的静态网络基础上, 叠加海域中灾害性天气和管制等海域限制因素对局部航线的通行影响, 拓扑重构得到的弧段具有动态通达特征的一种网络模型。动态通达网络 $G(V, E)$ 的要素定义如下:

收稿日期: 2014-05-15

项目来源: 国家留学基金资助项目(201206275018); 青岛市科技计划基础研究资助项目(13-1-4-218-jch)。

第一作者: 汤青慧, 博士, 主要从事交通地理信息系统、空间决策支持等研究。E-mail: seaytangqh@163.com

通讯作者: 唐旭, 博士, 副教授。E-mail: LandSky@whu.edu.cn

1) 网络结点集 V 。 V 中的网络结点 v_i 是港口集 H [港口编号]、航线集 L 自身的交点集 K [航线编号₁, 航线编号₂]、航线集 L 与碍航区 O 的交点集 B [碍航区编号] 等三类点集的并集, 其属性项定义为 v_i [结点编号, 类型编码, 港口编号, 航线编号₁, 航线编号₂, 碍航区编号, 影响碍航区序列]。其中, 根据结点来源, 类型编码分别用“ H ”、“ K ”和“ B ”区分, 影响碍航区序列则以“,”为分隔符存储多个包含结点的碍航区编号, 其他属性项内容则分别与 3 类点集的对应属性项内容一致。

2) 网络弧段集 E 。 E 中的网络弧段 e_i 是航线集 L [航线编号] 中航线被结点集合 K 、 B 分割后生成的航线段, 其属性项定义为 e_i [弧段编号, 结点编号₁, 结点编号₂, 航线编号, 弧段长度, 禁航时段序列]。其中, 结点编号₁ 和结点编号₂ 分别存储弧段端点对应的结点编号; 航线编号则与弧段所在航线的对应属性一致; 禁航时段序列采用分隔符“;”将多个碍航区的分段影响时间信息连接成一维序列化字符串存储, 而单个禁航时段的具体格式为“(序号, 碍航区编号, 禁航开始时间, 禁航结束时间)”。

由定义可知, 动态通达网络模型实现了空间拓扑及环境影响等多源信息的网络集成, 除了具备静态网络中的结点-弧段拓扑关系外, 网络结点来源具有多样性, 网络弧段通达具有动态性。这使得本文研究的航程决策分析区别于传统静态航线网络分析。

1.2 碍航区多边形提取

碍航区指对船舶安全通行产生影响而需要避免的障碍区域, 其动态变化是导致航线通达性改变的主要因素。根据碍航区是否具有空间移动性, 将其分为静止碍航区和移动碍航区。

1) 静止碍航区。根据出现时间的持续性, 静止碍航区分为临时性和永久性两类。前者如军事禁航区、季节性渔场、能见度管制等, 后者如岛礁、浅滩、沉船等。提取这些区域边界的特征点地理坐标, 生成静止碍航区多边形集合 $O_s = \{o_i^s, 1 \leq i \leq m\}$ 。 m 为静止碍航区个数, o_i^s 的生存周期为 $[t_s^k, t_e^k]$ 。

2) 移动碍航区。台风等极端天气在空间上沿可预测方向以一定的作用半径移动, 进而形成移动碍航区 $O_D = \{o_k^D, 1 \leq k \leq n\}$ (n 为碍航区中心个数)。移动碍航区的描述参数包括初始时刻中心坐标 (φ_k, λ_k) 、影响半径 r_k 、移向 C_k 、移速 v_k , 其在时段 $[t_s^k, t_e^k]$ 的空间影响范围可以通过移动轨迹

缓冲带计算得到的多边形来表示。

1.3 动态通达网络建立

动态通达网络的实时构建是快速、有效整合航程规划所需信息的基础算法, 是将碍航区与静态航线网络叠加, 确定航线禁止航行时间段的过程, 具体如图 1 所示。

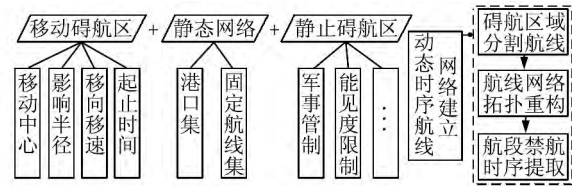


图 1 动态通达网络的建立流程

Fig. 1 Building Processes of Dynamic Access Network

动态通达网络建立包括 4 个技术环节: (1) 静态网络构建。将港口间所有航线进行相交运算得到交点集 K 和航线段集合 L_1 , 与港口集 H 一起构建静态网络。(2) 碍航区分割航线。将静态碍航区和动态碍航区的多边形与航线段集合 L_1 进行叠加, 对如下两种情况分别进行处理: ① 多边形包含航线段: 将对应碍航区的 [碍航区编号] 直接添加到航线段端点的属性项 [影响碍航区序列] 中; ② 多边形与航线段相交: 生成交点集 B 和打断相交航线, 航线段集合 L_1 变为 L_2 , 将对应碍航区的 [碍航区编号] 直接赋予交点的 [碍航区编号] 并同时将其添加到多边形包含的航线段端点属性项 [影响碍航区序列] 中。(3) 航线网络拓扑重构。将三类点集 H 、 K 和 B 合并生成网络结点集 V , 将航线段集合 L_2 作为网络弧段集 E , 搜寻网络弧段 e_i 起始、终止结点的 [结点编号] 分别存入属性项 [结点编号₁] 和 [结点编号₂] 中, 实现网络拓扑的构建。(4) 弧段禁航时序提取。根据弧段 [结点编号₁] 和 [结点编号₂] 在 V 中检索对应结点, 提取结点的 [影响碍航区序列]。当同一碍航区编号在起始和终止结点的 [影响碍航区序列] 中都出现时, 表明该航线段受到碍航区影响。当影响碍航区为静态时, 在该弧段的 [禁航时段序列] 中添加一个根据碍航区编号和其生存周期 $[t_s^k, t_e^k]$ 生成的禁航时段。当影响碍航区为动态时, 则需要考虑其预报的移动特性计算影响弧段的禁航时段。

如图 2 所示, 以碍航区轨迹线上的点 (φ_k, λ_k) 为中心, r_k 为影响半径做缓冲区 C , 分别计算 C 与弧段进入相切的时间 t_s (图 2(a)) 和离开相切的时间 t_e (图 2(c)), 向该弧段 [禁航时段序列] 中添加时间段为 $[t_s, t_e]$ 的禁航时段。

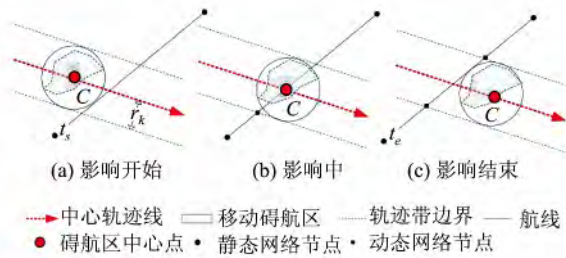


图 2 移动碍航区影响弧段的禁航时段
Fig. 2 Time Segment of Sailing Prohibited by the Influence of Mobile Obstacle

2 最优航程规划方法

2.1 技术流程

局部海域变化情景下的航程规划的实质是按照一定的约束准则在动态通达网络 $G(V, E)$ 中开展路径寻优,并设计 4 类优度逐级递减的航程规划方案判别的算法过程。

1) 规划参数的初始化。除了需要按 § 1 中方法构建动态通达网络 $G(V, E)$ 外,还需要以下

规划参数:① 计划航线 L_p 即 $G(V, E)$ 中连接出发港 h_s 和目的港 h_t 的路径;② 决策时点,为获取气象信息进行决策分析的时点 t_0 ,对应时点船的空间位置 P_0 ;③ 舰船性能参数,主要指船舶的续航能力:假设船舶油储备量为 Q ,以经济航速 V 航行的单位油耗为 $F(V)$,则续航能力 $A = Q/F(V)$ 。

2) 三种约束准则建立。为实现航程安全性、可达性和经济性,航线规划需遵循三个准则。(1) 航线通达准则:保证船舶到达新规划航线中每个航段的起始端点时,航段都是通畅的;(2) 续航约束准则:新规划航线总长度不得超过舰船的续航能力;(3) 航线择优准则:新规划航线应是所有可选航线中最短的。

3) 优度递减决策过程。沿计划航线继续前行(续航)、选择新的最短绕行航线(改航)、选择最佳邻港进行停靠搜索(停靠)或原地等待救援是 4 类优度递减的船舶应对极端天气的决策策略。最优航程规划的决策过程遵循“择优不成则退而求其次”的原则进行。

具体技术流程如图 3 所示。

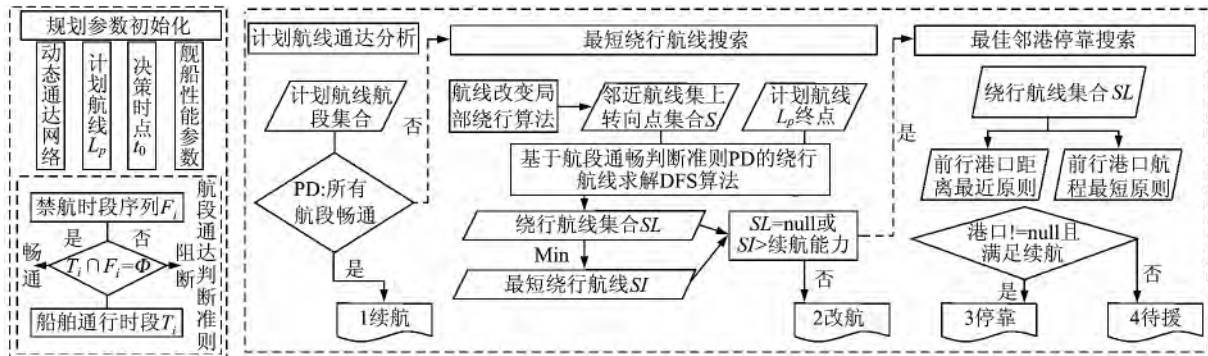


图 3 最优航程规划的技术流程图

Fig. 3 Technology Flowchart for Optimal Voyage Planning

2.2 规划算法

如图 3 所示,最优航程规划流程中总共包括航程通达性的判断算法、航线改变局部绕行算法、最短绕行航线搜索算法和最佳停靠邻港搜索算法等 4 个算法。

2.2.1 航程通达性的判断算法

航程通达性判断是确定船舶经过航线上任一弧段时,航行是否受到碍航区影响的过程,这是决定后续航程是否需要调整的重要依据。具体方法如下:(1) 设拟航行航线的航线段序列为 $E_k \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$, 初始化 e_i 通达性指示变量 $flag_i = 0$; (2) 设当前船位为 P_0 , 航速为 V , 决策转向时间为 t_0 , 计算当前船位 P_0 沿航线到航线段 e_i 起点的累

计距离 D_i , 则船舶到达时间为 $t_1 = t_0 + D_i/V$; (3) 设航线弧段 e_i 的长度为 d_i , 则船舶离开航线段终点的时间 $t_2 = t_1 + d_i/V$, 确定航线段 e_i 的拟通行时段 $T_i [t_1, t_2]$; (4) 提取航线段 e_i 的[禁航时段序列], 分段解析获取禁航时间段序列 $F \{F_1, F_2, \dots, F_i\}$, 循环判断 T_i 与 F_i 的时间区间是否相交, 如果相交, 则令 $flag_i = 1$; (5) 对航线所有航线段进行步骤(2)~(4)的计算判断, 并对所有 $flag_i$ 值 ($1 \leq i$) 求并, 若结果为 1, 航程不通达, 反之, 通达。

2.2.2 航线改变局部绕行算法

航线改变局部绕行算法是要在避开碍航区 O 的情况下, 获取船舶位置 P_0 的多条邻近航线, 并

确定邻近航线上距离 P_0 最近的点构成转向点集合 S 。参照文献[10]思想,设计算法如下:(1)以当前位置 P_0 为中心,选取一个较小的半径做缓冲区,获取邻近航线段集合 $L_k \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$;(2)在邻近航线段 l_i 上取 P_0 的最近点 P_1 ,以连线 $P_0 P_1$ 作为可航渡的测试线;(3)如果连线 $P_0 P_1$ 与 O 中碍航区均不相交,则船舶可以直接通过 $P_0 P_1$ 绕行到航线段 l_i 上;否则,在距 P_0 最近的碍航区 o_m 的边界上寻找一个点 P_t ,使 $P_0 P_1$ 与 $P_0 P_t$ 之间的方位差最大,由 P_t 替代 P_0 ,递归进行步骤(3),直到 $P_0 P_1$ 之间不存在碍航区;(4)记录所有邻近航线上距离 P_0 最近的点 P_{1i} 到 S 中,为最短绕行航线搜索算法提供基础数据。

2.2.3 最短绕行航线搜索算法

最短绕行航线搜索算法主要是在 § 2.2.2 局部绕行计算结果的基础上,求解船舶位置 P_0 到目的港 h_i 的最短可通达航线。具体方法如下。

1) 对任一航线转向点 P_{1i} ,在动态通达网络 $G(V, E)$ 上采用图论中深度优先遍历算法(DFS)^[19],搜索 P_{1i} 至目的港 h_i 的所有路径,按照 § 2.2.1 算法对所有路径进行通达性判断,形成可连通的路径集合 R_i 。

2) 在集合 R_i 中检索长度最短的路径,将路径长度与 § 2.2.2 中计算得到的对应 $P_0 P_{1i}$ 长度相加,得到 $P_0 - P_{1i} - h_i$ 的最短航线距离。

3) 对集合 $S \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1k}\}$ 中所有邻近航线转向点都按照步骤(1)~(2)计算,得到 $P_0 - P_{1i} - h_i$ 的最短航线距离,建立最短航线集合 SL ,从中找出最短者为船舶位置 P_0 到目的港 h_i 的最短可通达航线 S_i 。

4) 比较 S_i 航线长度 d 与船舶续航能力 A 。如果 $d < A$,则提取 S_i 包含的绕行航段 $P_0 P_{1i}$ 和最短路径的航线段集合,执行绕行策略;如果 $d > A$,表明续航能力不足,需在中途选择港口停靠补给。

2.2.4 最佳停靠邻港搜索算法

最佳停靠邻港搜索算法在续航能力不足绕行失败的情况下执行,目的在于确定一个最佳停靠港口供船舶增加补给,以保证船舶有足够的续航能力沿绕行航线到达目的港。一般基于两个原则进行邻港的搜索:(1)宽度搜索优先原则:分别在 § 2.2.3 的最短航程集合 S_i 中每一条路径上,搜寻距离船舶位置 P_0 最近的网络结点(类型编码="H");(2)深度搜索优先原则:在 § 2.2.3 的最短可通达航线 S_i 上,搜寻距离船舶位置 P_0 最近的网络结点(类型编码="H")。

2.3 方法实现

采用 ESRI 的 Personal GeoDatabase 存储本文涉及的底图、静态网络、碍航区、动态通达网络等数据,并使用 ArcMap 建立工程 OVPS.mxd 进行数据组织。利用 C# 和 ArcObjects 开发组件 DANM.dll 实现本文研究的规划算法,并在 ArcMap 中打开 OVPS.mxd 和加载 DANM.dll 执行规划方法的实验。

3 实验与分析

3.1 场景模拟

1) 静态航线网络。本文以东南亚海域为例,根据大洋航路图、航路设计图等资料选取香港(h_1)、马尼拉(h_2)、胡志明(h_3)、哥打基纳巴卢(h_4)、文莱(h_5)、诗巫(h_6)、古晋(h_7)、新加坡(h_8) 8 个主要港口和连接港口的 15 条已知经验航线。其中,航线 $l(h_1, h_4)$ 与 $l(h_2, h_3)$ 、 $l(h_3, h_6)$ 与 $l(h_4, h_8)$ 、 $l(h_3, h_7)$ 与 $l(h_4, h_8)$ 、 $l(h_3, h_7)$ 与 $l(h_6, h_8)$ 分别相交于 k_1, k_2, k_3, k_4 。构建的静态航线网络(见图 4(a))包括网络结点 12 个(H 类 8 个和 K 类 4 个)、网络弧段 23 条,拓扑信息如表 1 所示。

表 1 静态航线网络的弧段拓扑信息

Tab. 1 Arc Topological Information of Static

Route Network

弧段编号	起结点	终结点	弧段编号	起结点	终结点
11	h_1	h_2	113	h_5	h_6
12	h_1	k_1	114	h_6	h_7
13	h_1	h_3	115	h_7	h_8
14	h_2	k_1	116	k_2	h_4
15	h_3	k_1	117	k_3	k_2
16	h_2	h_4	118	h_6	k_4
17	h_4	k_1	119	h_3	k_3
18	h_3	h_4	120	k_3	k_4
19	h_3	k_2	121	k_4	h_7
110	k_2	h_6	122	h_8	k_3
111	h_3	h_8	123	k_4	h_8
112	h_4	h_5			

2) 碍航区域数据。以 2013 年菲律宾西部海域苏禄海面生成的台风“清松”为例,参数为:1 月 3 日 20 时,台风中心位置($9.1^\circ\text{N}, 119.5^\circ\text{E}$);预计 1 月 7 日 20 时,台风中心位置($6.2^\circ\text{N}, 108.1^\circ\text{E}$),根据航迹计算公式推算得到台风未来 96 h 的移动方向 C 为 75°SW 、平均移速 v 为 18.8 km/h ,7 级风圈半径约为 120 km (见图 4(b))。

3) 动态通达网络。按 § 1 所述方法将台风运动轨迹带与静态航线网络叠加,得到包含 20 个

网络结点(H类8个、K类4个、B类8个)、31条网络弧段(4条受碍航区影响)的动态通达网络(见图4(b)),拓扑信息如表2所示。

4) 舰船计划航线。某船从新加坡(h_8)至香港(h_1),计划航线由弧段 e_{30} 、 e_{20} 、 e_{19} 、 e_6 、 e_5 、 e_4 、 e_{14} 顺次连接而成。航速35 km/h,单位油耗2.4917

t/h,续航能力A为2500 km(见图4(a))。

5) 决策时点与需求。以船舶接收到台风预报信息的时间1月3日08:00为决策时点,对应的决策船舶位置为 P_0 (见图4(b)),现需要基于前述数据信息对船舶未来航程进行规划。

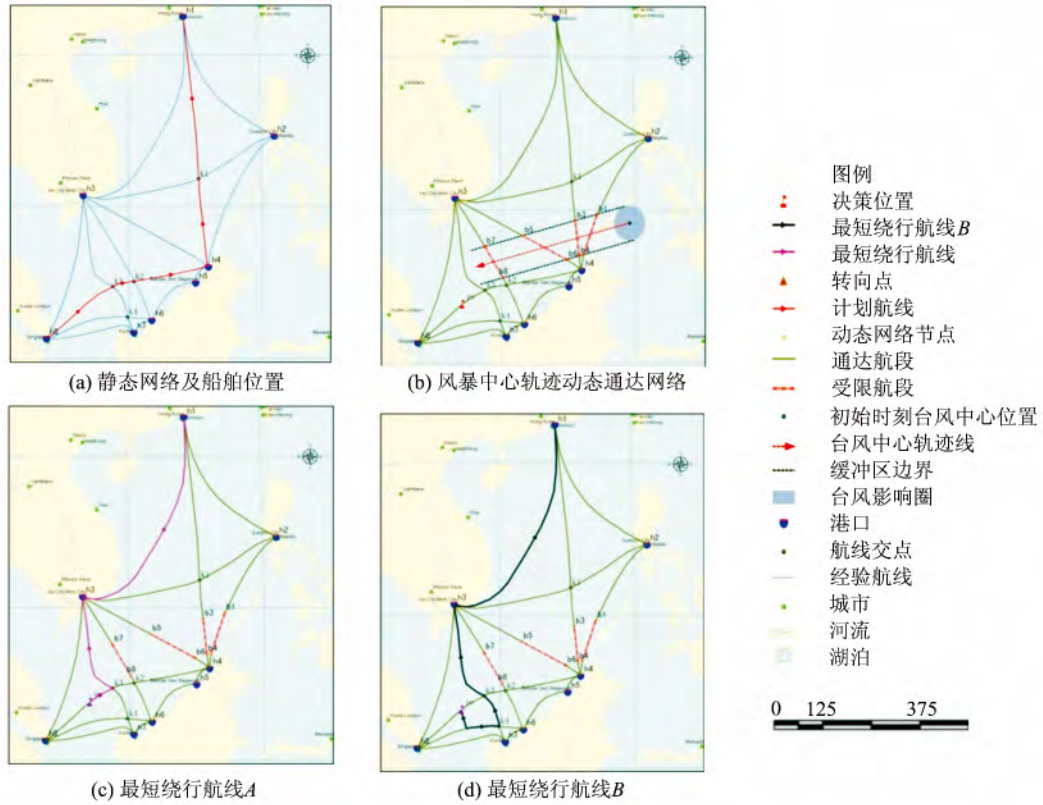


图 4 船舶航程规划的场景数据及规划结果

Fig. 4 Scene Data and Results of Ship Voyage Planning

表 2 动态通达网络的弧段拓扑信息

Tab. 2 Arc Topological Information of Dynamic Access Network

弧段编号	结点编号 1	结点编号 2	弧段长度/km	禁航时段序列	弧段编号	结点编号 1	结点编号 2	弧段长度/km	禁航时段序列
e_1	h_2	b_1	649.064		e_{17}	h_3	k_1	886.066	—
e_2	b_1	b_2	285.359	$1, \sigma_T, 201301040402, 201301041818$	e_{18}	h_3	h_8	994.044	
e_3	b_2	h_4	94.394		e_{19}	k_2	h_4	559.755	
e_4	b_3	k_1	249.986		e_{20}	k_3	k_2	162.563	
e_5	b_4	b_3	238.117	$1, \sigma_T, 201301041020, 201301042206$	e_{21}	h_4	h_5	156.384	—
e_6	h_4	b_4	96.967		e_{22}	h_5	h_6	435.113	
e_7	h_3	b_5	552.193		e_{23}	h_6	h_7	168.009	
e_8	b_5	b_6	370.536	$1, \sigma_T, 201301041944, 201301051351$	e_{24}	h_7	h_8	680.340	—
e_9	b_6	h_4	118.581		e_{25}	k_4	h_6	176.333	
e_{10}	h_3	b_7	377.541		e_{26}	k_2	h_6	288.772	
e_{11}	b_7	b_8	257.791	$1, \sigma_T, 201301051815, 201301060617$	e_{27}	h_3	k_3	669.517	—
e_{12}	b_8	k_2	44.079		e_{28}	k_3	k_4	235.100	
e_{13}	h_1	h_2	1083.018		e_{29}	k_4	h_7	110.267	
e_{14}	h_1	k_1	1068.227		e_{30}	k_3	h_8	605.632	
e_{15}	h_1	h_3	1582.821		e_{31}	k_4	h_8	630.194	
e_{16}	h_2	k_1	633.310						

3.2 规划结果

1) 计划航线通达判断。计划航线上弧段 e_5 ($b_4 b_3$) 受台风影响, 禁航时段为(201301041020, 201301042206), 从 P_0 至 b_4 、 b_3 的航线长度分别为 1 010.524 8 km、1 248.641 6 km; 船舶从 P_0 航至 b_4 、 b_3 耗时分别为 28 h 43 min、35 h 29 min, 在 e_5 拟通行时段为(201301041242, 201301041929)。对比禁航和通行时段, 可知时间重叠。据 § 2.2.1 算法知该计划航线受台风影响不可通行。

2) 最短绕行航线搜索。按照 § 2.2.2 算法,

在 P_0 点以半径 150 km 搜索得到邻近航线 L_k $\{e_{18}, e_{30}\}$ 并确定对应转向点集合 $S\{P_0, P_1\}$ 。按照 § 2.2.3 算法, 对 P_0 至目标港口 h_1 的 100 条连通航线进行通达性判断, 获取 59 条通达航线中最短的航线 $A: P_0-k_3-h_3-h_1$ (见图 4(c)); 对 P_1 点至目标港口 h_1 的 122 条连通航线进行通达性判断, 选取 88 条通达航线中最短的航线 $B: P_1-k_4-k_3-h_3-h_1$ (见图 4(d))。将两条最短航线加入最短绕行航线集 S_e , 比较长度得到最佳绕行航线为 $P_0-k_3-h_3-h_1$ (表 3), 绕行长度为 2 443.57 km。

表 3 最短绕行航线搜索结果对比

Tab. 3 Comparison of the Shortest Detouring Route

序号	邻近航线	转向点 P	D_{P_0-P} /km	连通路径途经结点	目的港	d_{P-h_1} /km	$\sum d$ /km	是否选择
①	$e_{18}(k_3-h_3)$	P_0	0	k_3-h_3	h_1	2 443.57	2 443.57	✓
②	$e_{30}(k_4-h_3)$	P_1	138.49	$k_4-k_3-h_3$	h_1	2 717.33	2 855.82	

3) 最佳停靠邻港搜索。船舶满载续航能力 2 500 km, 在 $h_8 P_0$ 段已航行 414.4 km, 而上一步计算的最佳绕行航线长 2 443.57 km, 大于剩余续航能力 2 085.6 km, 因此应考虑选择合适邻港停靠增加补给。由 § 2.2.4 算法, 按照深度优先原则在最佳绕行航线 $P_0-k_3-h_3-h_1$ 上搜索距离 P_0 最近的港口为 h_3 , 得到 $P_0-k_3-h_3$ 长度为 1 275.16 km, 满足船舶的续航能力。因此, 该船应执行停靠 h_3 增加补给后续航到达 h_1 的方案。

4 结 语

海域水文和气象信息很难做出长期准确的预报, 基于可预报的海域环境动态变化信息, 获取后续的最优航程计划是远洋航行和海洋指挥救援的重要技术需求。本文构建的动态通达网络模型很好地描述了军事禁航区、季节性渔场、能见度管制等临时性的和岛礁、浅滩、沉船等永久性的静止碍航区以及台风等极端天气形成的移动碍航区对航线网络的动态阻隔影响特征。在此基础上, 按照“优度递减”策略设计的包含计划航线通达分析(续航决策)、最短绕行航线搜索(改航决策)、最佳停靠邻港搜索(停靠决策)等步骤的最优航程规划方法, 顾及了航线通达、续航可行和航线最短等约束, 很好地模拟了实际航行中因为规避环境动态变化影响对计划航线进行动态修正的决策场景。本文方法能够实现航程安全性、可达性和经济性的最佳结合, 实验算法也验证了规划技术路线的可操作性。后续研究中, 将综合考虑碍航区动态变化、大风浪中船舶失速、船舶停靠等候避让决策等多种要素的综合影响, 使航程规划方法更加科

学、合理。

参 考 文 献

- [1] UUCTAD. Review of Maritime Transportation, Technical Report[R]. UNCTAD, 2009
- [2] Ronen D. Ship Scheduling: the Last Decade [J]. *European Journal of Operational Research*, 1993, 71(3):325-333
- [3] Ronen D. Cargo Ships Routing and Scheduling: Survey of Models and Problems [J]. *European Journal of Operational Research*, 1983, 12(2): 119-126
- [4] Christiansen M, Fagerholt K, Ronen D. Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives [J]. *Transportation Science*, 2004, 38(1):1-18
- [5] Christiansen M, Fagerholt K, Nygreen B, et al. Handbooks in Operations Research and Management Science[M]. Germany: Springer-Verlag, 2007
- [6] Metea M B. Planning for Intelligence Autonomous Land Vehicles Using Hierarchical Terrain Representation [C]. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, Raleigh, North Carolina, 1987
- [7] Li Yuanhui, Pan Mingyang, Wu Xian. Automatic Creating Algorithm of Route Based on Dynamic Grid Mode[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(3):34-39(李源惠, 潘明阳, 吴娴. 基于动态网格模型的航线自动生成算法[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(3):34-39)
- [8] Rafal S. A New Method of Ship Routing on Raster Grids, with Turn Penalties and Collision Avoidance [J]. *The Journal of Navigation*, 2006, 59(1): 371-384
- [9] Chang, K Y, Jan G E, Parberry I. A Method for

- Searching Optimal Routes with Collision Avoidance on Raster Charts[J]. *The Journal of Navigation*, 2003, 56(3):371-384
- [10] Zhang Lihua, Zhu Qing, Liu Yanchun, et al. A Method for Automatic Routing Based on ECDIS[J]. *Journal of Dalian Marine University*, 2007, 33(3):109-112 (张立华,朱庆,刘雁春,等. 电子海图平台下的航线自动设计方法[J]. 大连海事大学学报,2007,33(3):109-112)
- [11] Wang Zhu, Li Shujun, Zhang Lihua, et al. A Method for Automatic Routing Based on Route Binary Tree[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(4):407-410 (汪柱,李树军,张立华,等. 基于航路二叉树的航线自动生成方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(4):407-410)
- [12] Cao Hongbo, Zhang Lihua, Jia Shuaidong, et al. An Improved Method for Automatically Building Shortest Route Based on Electronic Chart[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011,36(9):1107-1110(曹鸿博,张立华,贾帅东,等. 电子海图最短距离航线自动生成的改进方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(9):1107-1110)
- [13] Chen Huafeng, Ye Shiping, Huang Zhicai, et al. Ocean Scientific Survey Route Designing Method Syncrctizing Triangulated Irregular Networks and Genetic Algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(11):1951-1957 (陈华锋,叶时平,黄智才,等. 融合不
- 规则三角网和遗传算法的大洋科考航线设计方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2009,43(11):1951-1957)
- [14] Wang Dechun, Chen Limin, Zhang Xiaofang. Selecting Ship's Optimum Route Using A* Algorithm[J]. *Journal of Qingdao University (Natural Science Edition)*, 2005, 18(4):10-13 (王德春,陈利敏,张孝芳. 基于A*算法的舰船最佳航线选择[J]. 青岛大学学报(自然科学版),2005,18(4):10-13)
- [15] Wu Fengping, Zhu Baochun. A Method to Select Ship's Minimum-Probability Line[J]. *Journal of Hohai University*, 2001,29(1):77-79
- [16] Bijlsma S J. On the Applications of the Principle of Optimal Evolution in Ship Routing[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2004,51(2):93-100
- [17] Li Yuanlin, Chen Hongbin. Design of Optimum Ship Route Using Weather Routing Techniques[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 1997,25(12):65-69 (李远林,陈宏彬. 船舶最佳气象航线的设计[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,1997,25(12):65-69)
- [18] Kang M H, Choi H R, Kim H S, et al. Development of a Maritime Transportation Planning Support System for Car Carriers Based on Genetic Algorithm[J]. *Applied Intelligence*, 2012,36:585-604
- [19] Wang Guiping, Wang Yan, Ren Jiachen. Graph Theory Algorithm Theory, Implementation and Applications [M]. Beijing: Peking University Press, 2011(王桂平,王衍,任嘉辰. 图论算法理论、实现及应用[M]. 北京:北京大学出版社,2011)

Optimal Voyage Planning Strategies Based on a Dynamic Access Network Model

TANG Qinghui¹ TANG Xu² CUI Xiaohui^{3,4} HU Shiyuan² LIU Yaolin²

¹ Institute of Management, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China

² School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ International School of Software, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ School of Engineering and Computing Science, New York Institute of Technology, New York 11360, US

Abstract: Routes of ships on voyage should be adjusted or replanned because of the influences of heavy weather or bad situation in local sea area. In this paper we present an optimal voyage planning approach based on a dynamic access network model. Firstly, a dynamic access route network is constructed by overlaying a static route network with some obstacle region polygons. The static route network is composed of all known ports and routes in a specific area. And the obstacle region polygons can be classified into 2 types: mobile region and static region. The former are shaped by extreme climate conditions, such as windstorm or hurricane, and the latter are shaped by marine topography limit and military control zones. Secondly, according to optimization degree in descending order, an optimal voyage

planning approach was designed based on the dynamic access network, which includes accessibility analysis of planned route which is called voyage proceeding strategy and computation of a new shortest route which is called route rounding strategy and seeking of an optimum neighbor port which is called sheltering strategy. Corresponding algorithms were also expounded in detail and its feasibility and effectiveness were confirmed by an experiment with simulation scene and data. The optimal voyage planning strategies proposed in this paper will play a significant role in the field of voyage decision making and maritime rescue.

Key words: voyage planning; dynamic access network; optimal decision; network analysis; shortest path

First author: TANG Qinghui, PhD, specializes in spatial decision support and transportation geographical information system. Email: seaytangqh@163.com

Corresponding author: TANG Xu, PhD, associate professor. E-mail: LandSky@whu.edu.cn

Foundation support: The National Scholarship Fund Program, No. 201206275018; Qingdao Science and Technology Program on Basic Research, No. 13-1-4-218jch.

.....
(上接第 497 页)

A Bilateral Structure Based Local Adaptive Regularization for Super-resolution

YUE Linwei¹ SHEN Huanfeng² YUAN Qiangqiang³ ZHANG Liangpei¹ LAN Xia⁴

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 School of Mathematics and Statistics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: This paper constructs an local adaptive regularization model built upon the Maximum A Posterior (MAP) framework for image super-resolution reconstruction. To prevent the noise pixels remained in the result image, we combine bilateral structure tensor with gradient in four directions to divide images into homogenous area and edge regions. The proposed method based on Iteratively Reweighted Norm (IRN) is employed as the regularization in the reconstruction model. This paper demonstrates the advantage over the results of the algorithm through two series of experiments for digital images with different texture. It is compared with Laplacian, traditional Huber-Markov Random Field (HMRF) and BTV model. The experimental results show that this improved method is efficient for SR image reconstruction and has promising advantage over smooth regions.

Key words: super-resolution; MAP; local adaptive; bilateral structure tensor; iteratively reweighted norm

First author: YUE Linwei, PhD candidate, specializes in image restoration and super-resolution. E-mail: yuelinwei2008@126.com

Corresponding author: YUAN Qiangqiang, PhD, associate professor. E-mail: qqyuan@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41271376, 61201342; the National Key Primary Research and Development Program Foundation, No. 2011CB707103.