基于GIS的PAD危险量化与可视化

### 摘要：

为了对船舶航行的海域空间的会遇危险度进行直观、连续的表达，构建船舶领域模型与动界模型，基于领域侵犯度 degree of domain violation与领域侵犯时间time to domain violation，以航迹线、领域边界和动界为关键点，运用GIS的手段对在未来时间内会发生碰撞危险的海域空间危险度进行插值，运用现有危险度计算方法构建评价点，对多种插值结果进行评价与选优，结果表明XX方法有效的表达。。。，相关性为。。。，， 结果可提供直观、连续的的航行空间危险度计算结果， 为安全避碰提供合理依据 。

### 1.背景介绍

根据联合国贸易和发展会议（2018）的数据，过去50年来，全球海上贸易总量一直稳定增长，年均增长率约为3.1％。2016年，全球海运贸易量达到103亿吨，约占全球商品贸易总额的80％【1】。伴随着海运业的繁荣，船舶数量日益增长，海上交通密度逐渐增大，海上交通事故发生率也逐年变多，安联《2017年安全与航运报告》中显示船舶沉没、损坏/搁浅、火灾/爆炸、机械故障以及碰撞是过去十年海上失事最常见的原因，在过去十年报告的25967人伤亡中，船舶碰撞占3787人。碰撞危险度作为进行避碰决策与行为的重要依据，其计算方法全面性、准确性，展示方法直观性、高效性，成为受到广泛关注的研究和实践领域。

在船舶碰撞危险度计算领域，《国际海上避碰规则》（COLREGs）中的给出了碰撞危险的明确定义，但没有给出明确的碰撞危险度的计算方式。 distance at closest point of approach (DCPA) 和 time to the closest point of approach (TCPA)以其计算方法简单，计算结果明确的特点，在电子海图与Automatic Radar Plotting Aid (ARPA)中，都受到了广泛的应用，并成为了船舶避碰和决策支持系统构建的行业标准。在船舶避碰实际运用中，通常采用给DCPA与TCPA设置安全阈值的方法，通过大量的调查研究，当DCPA小于一定距离，或TCPA少于一定时间时，则认为两船存在碰撞风险，但是这种方式具有“一刀切”的特点【3】，不符合当前航运的发展趋势。在此基础上，众多学者通过对时间安全阈值与空间安全阈值进行综合考虑、优化建模，使得碰撞危险度计算方法能够适应各种航行态势要求，碰撞危险度计算结果符合驾驶员心理感觉与船舶实际操控能力。Kearon【4】通过对DCPA与TCPA进行加权计算，判断两船的碰撞危险度大小，该方法虽然综合考虑了DCPA与TCPA对碰撞危险度的影响，但在模型实际运用中，固定的比例系数不能完全满足各种航行条件，会遇状况下的要求。许多学者（郑中义、严庆新、A Research on AIS-based Embedded System for Ship Collision Avoidance、Multi-Ship Collision Avoidance Decision-Making Based on Collision Risk Index、Composition ship collision risk based on fuzzy theory、Ship Automatic Collision Avoidance by Altering Course Based on Ship Dynamic domain）建立了DCPA与TCPA的危险隶属函数，并使用模糊数学方法，考虑距离、相对方位、船速比等会遇影响因素，综合构建碰撞危险度模型，这种方法符合实际操船的逻辑，得到的碰撞危险度计算结果准确性较高，被广泛应用于船舶避碰航线仿真中。

为了满足碰撞危险度的可视化需求，直观的展示碰撞危险海域的空间分布，更好的做到人机交互式的决策辅助支撑。PAD（predicted areas of danger）被首次应用到SPERRY ARPA系列中，当它被用于会遇态势分析时，可以实现预测危险从“点”到“区域”的转变，但是由于ARPA本身特性的限制，这些优势无法体现。随着计算机技术的迅猛发展，现代电子海图与GIS，有足够的能力，实现PAD的可视化。许多学者（Imazu，Fukuda，Sawada）针对OZT（Obstacle zone by target）对碰撞危险区域进行了可视化研究，OZT最初是为了显示本船在目标船航线上的碰撞危险区域而开发的，通过引入真实船舶运动信息，设置安全会遇距离，结合其他可视化与会遇安全分析模型，快速评估碰撞风险，计算显示驶入碰撞危险海域的时间与PAD的范围。但是OZT模型的解算是以最小安全会遇距离为半径的圆形为基础的，不能完全考虑《规则》中的避让责任问题，且在模型中，由于反三角函数的范围约束，在很多情况下不能对会遇危险进行有效判断。Rafal Szlapczynski a ， Joanna Szlapczynska（2篇） 提出了一种基于Collision Threat Parameters Area（CTPA）显示船舶避碰信息的方法，实现了目标船运动参数，以及针对静态与动态碍航物的危险航向/航速组合的可视化显示，并基于剩余remaining Time To Collision（TTC）过滤系统显示的数据，以便驾驶员可以专注于直接威胁。VO（Velocity Obstacle）模型也为解决PAD的可视化问题提供了新思路，速度障碍法通常是在机器人领域中解决机器人避开移动障碍物的常用方法，在航行避碰领域中，许多学者（Ming-Cheng Tsou， Aleksishin【5】）利用VO模型，通过确定船舶会遇的安全边界以及船舶的运动状态，设计数值方法来定义安全的速度矢量，实现了PAD的可视化，但从结果来讲，只做到了定性分析，没有做到定量分析。

船舶领域与动界因为其本身具有的空间范围属性，并很好的满足了航行会遇的实际需求，非常适合应用于碰撞危险区域的可视化研究。船舶领域作为用来描述船舶为了保持安全航行的状态下，不受危险物侵犯的安全水域，相比于固定的最小安全会遇距离（MSPD），可以有效的满足船舶在海上航行时，最小安全会遇距离各向异性的要求。动界概念最早由英国学者Davis等人提出，是驾驶员为避免构成紧迫局面而采取行动时，本船与他船距离构成的超级领域，在此边界上，两船的碰撞危险度可以视为零。许多学者（COLDWELL，KIJIMA K，WANG N）针对不同的航行条件，使用观察数据统计、数值分析和智能技术等方法构建了船舶领域模型。随着船舶领域与动界构建研究的不断深入，Szlapczynski【8】提出了一种新的碰撞危险度的计算方法。这种计算方法将侵入他船船舶领域作为会遇状况的一种，介绍了本船与目标船在相对于船舶领域模型位置最近时，目标船船舶领域的缩放尺度的计算方法，并依据该缩放尺度提出了DDV degree of domain violation的概念，该方法同时可以计算本船进入和离开目标船船舶领域的时刻，及两船存在碰撞危险的时间范围，提出了TDV（Time to domain violation）的概念。这种方式相比于DCPA与TCPA来说，运用了船舶领域的概念，在一些会遇情况中，危险度变化梯度更为明显，具有更强的危险探知敏感性。并且根据会遇危险时间范围，可以计算在未来有会遇危险的海域空间信息。但是，在许多研究中，船舶领域都被定义为不可侵犯的航行安全实体边界，侵入他船船舶领域意味着存在很大的碰撞风险，而在DDV的危险判断中，若两船不发生碰撞，无论距离有多近，危险度都不会取到最大，将整个有碰撞危险发生的海域空间的危险度都视为DDV是不合理的。

综合其他学者的研究成果，本文通过运用船舶领域模型，计算多目标船的DDV/TDV，求解PAD范围，改进PAD内部碰撞危险度分布状态，实现PAD及其内部碰撞危险度的可视化。本文主要进行了以下工作，1.在该计算方法中，引入动界的概念，构建更合乎航行安全要求的碰撞危险度关键点位集合。2.基于TDV对多目标船会遇危险海域进行显示，并应用不同的GIS空间插值方法，讨论方法模型中参数的设置，生成多样化空间插值结果。3.利用对现有的基于DCPA/TCPA的传统成熟碰撞危险度计算生成评价点集合，通过相关性分析对插值结果进行评价选优。

### 2.领域模型构建与碰撞危险度计算

#### 2.1船舶领域模型构建

船舶领域作为船舶驾驶员避开其他船舶或固定物体而保持的有效水域周围，其研究可成为船舶领域模型是船舶碰撞危险度评价、航行安全、避碰决策的重要理论依据。船舶领域受多种异类复杂不确定性因素影响，如人、环境(包括自然环境和交通环境等)和船舶本身的因素等，因此，难以用传统的建模方法进行统一或系统的解析描述。船舶领域在不同的水域的不同的航行条件下会有不同的形式。一般来说，船舶领域的形状主要有椭圆形、多半径圆形以及新兴算法拟合的不规则图形等。在这些领域中，椭圆形领域既可以反映安全会遇距离各向异性的问题，又具有构建简单，可塑性强的优点。因此，本文选择Szlapczynski提出的椭圆形领域，该领域将船舶的位置放置在偏移椭圆中心左下四分之一的位置处，满足了COLREGS规则中对右舷以及对遇船舶应加强警觉的要求（IMO，1972； Cockcroft和Lameijer，2011），以及船舶驾驶员对碰撞危险的感知。

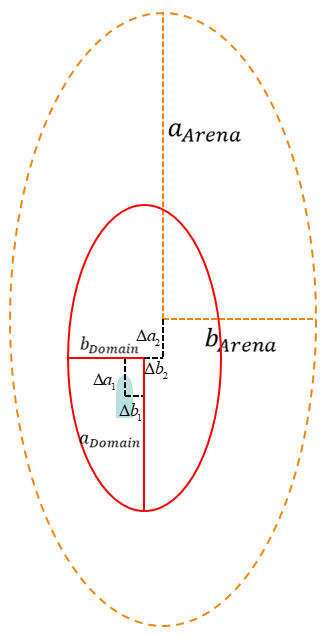


图1 领域与动界模型

船舶领域是为了保持航行安全而确定的隔离边界，若其他船舶驶入该领域内，则认为有极大概率会发生船舶碰撞。为了实现碰撞风险的量化分析，还应该确定一个水域范围，表示若目标船驶入该范围，则认为本船与目标船存在碰撞的风险。该领域范围的边界，是船舶驾驶员在与他船会遇时考虑船舶操控能力、航行状况等因素，感受到与他船存在碰撞风险的初始边界，在这里，本文引用Davis提出的动界概念，动界的边界上，碰撞危险度为0，故也可称为空间危险度零边界。郑中义（船舶空间碰撞危险度的概念及其模型）通过调查与统计，利用数值分析的方法，认为空间危险度零边界约为安全会遇距离的2倍。依据该理论，我们建立了图1所示的动界模型。该模型虽然不能保证各个方向上船舶位置到动界边界为船舶位置到船舶领域边界距离的2倍，但是可以很大程度上保证船舶在领域中的相对位置不变，便于后期碰撞危险度的计算，图中各变量的实际意义为：

* 动界半长轴：
* 动界半短轴：
* 船舶领域半长轴：
* 船舶领域短半轴：
* 船舶位置半长轴偏移：
* 船舶位置短半轴偏移：

公式中，为目标船的船舶长度。

#### 2.2碰撞危险度计算

Szlapczynski介绍了一种从船舶领域的概念衍生而来的新型碰撞危险度计算方法，这种方法适用于所有的椭圆形船舶领域，用趋近因子approach factor 作为的替代，表示本船与目标船在会遇时，若两船保持目前的航速与航向进行航行，到达相对于船舶领域与动界模型的最近点时，趋近因子所达到的最小值。在本文中，为了进一步研究碰撞危险度的空间分布情况，用表示本船侵入目标船动界的最大程度，可用公式1表示，其计算方法可由公式2表示。

 （1）

 （2）

如图3所示，式1中表示本船到达与目标船相对于船舶动界的最小会遇距离点时，本船到目标船动界中心的距离，表示在该相对方位上，目标船的船舶领域中心到动界边界的距离。图3中，、分别表示本船侵入和离开目标船动界的时间，表示本船到达相对于船舶动界的最小会遇点的时间，该时间的确定受船舶动界形状，两船相对位置与角度，两船相对航向与航速等因素的影响。公式2中，，表示考虑动界中心偏移与两船相对速度的两船相对坐标，表示目标船的航向，、表示动界的半长轴、半短轴。通过对该公式进行解算，可以获得动界最大侵入程度，到达该位置的剩余时间，以及本船侵入和离开目标船动界的时间和。

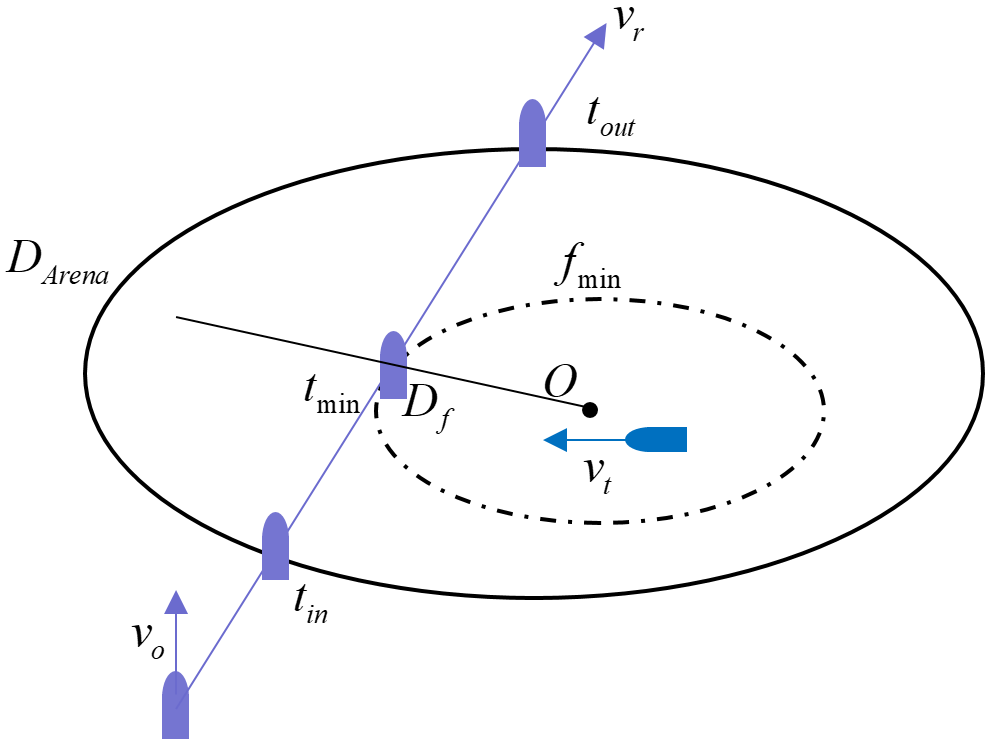


图3 缩放因子示意图

由于碰撞危险度在船舶领域与动界中的分布并不是简单的线性变化，通过上述计算方法得到的动界最大侵入程度，仅能在空间位置上说明未来两船会遇的线性紧迫程度，并不能直接表示碰撞危险度。若认为碰撞危险度在动界中，从领域中心到边界的变化趋势呈指数函数型，则需要确定该变化的幂指系数。郑中义在考虑多种因素对空间碰撞危险度影响的前提下，认为在船舶航行的过程中，驾驶员对于碰撞危险的判断，主要是依靠视觉从海上或从雷达上确定的，因此主要是受到光的影响。基于刺激-反应的理论，人对光的心理感应随着光的强度增加而增强，其心理感应强度系数是0.33。因此在本文研究的内容中，对空间与时间碰撞危险度的幂指数取 n = 1/0. 33= 3. 03。

本文的船舶碰撞危险度的确定方法同时考虑了空间与时间因素，为了考虑多船会遇的情况，以目标船为中心建立船舶领域与动界模型。其中，空间碰撞危险度的计算通过确定目标船动界最大侵入程度来确定，两船的空间碰撞危险度的计算方法可由公式3表示。图4是碰撞危险度随领域缩放因子的变化情况。

 （3）

两船碰撞的时间危险度可由到达相对于动界的最近会遇点的剩余时间进行确定，具体计算方法如公式4所示。公式中表示侵入目标船船舶领域的时间，当时，本船不会侵犯目标船的船舶领域，故=0。当时，表示本船会入侵到目标船的船舶领域中，形成极大的碰撞风险，从船舶领域边界行驶到最近会遇点的时间可以用公式5中的计算方法表示，其中，约为动界的半长轴，表示船舶领域边界与领域中心之间的距离，表示最近会遇点与领域中心之间的距离。开始表示对目标船采取关注的时间。通常认为船舶之间的6-8海里是船舶的自由行驶阶段，本文将6海里设置为两船具有时间碰撞危险度的初始距离。

 （4）

 （5）



对空间碰撞危险度与时间碰撞危险度进行组合，得到的碰撞危险度集合定义为：



在碰撞危险度判断中，该算子的实际使用方法为

1. 若=0，则=0；
2. 若≠0，=0，则=0；
3. 若≠0，0，则；

### 3.当前碰撞危险判断与显示

GIS以计算机为核心，电子海图数据库为基础，结合输入传感器与输出终端设备构成。它具有传统纸质海图无法比拟的优点，不仅能够连续地给出船位信息，还能够通过接入各种传感器输入将与航海有关的各种信息进行数据的融合，并将结果通过输出交互界面展示，有效地防范各种碰撞危险。因此，我们在GIS平台下，可以实现对实时AIS数据的格式转换，数据预处理，数据存储，以及符号化展示，实现一定范围内目标船碰撞危险度的实时计算。通过设置会遇危险阈值，实现对不同危险度目标船的多样化展示方式，有效的支持驾驶员对航行潜在风险进行预知与防范。为了验证本文提出的船舶领域模型与碰撞危险度计算方法的可行性，增强GIS方法技术应用于船舶避碰领域的能力，我们在开阔水域设计了一个仿真实验。实验中，本船与目标船的船位标识在图5展示，表1详细记录了本船与目标船的航向航速，相对位置等信息。在该模拟情景中，沿y轴对称的目标船DCPA/TCPA是相同的，以此来验证在传统碰撞危险度计算结果一致的情况下，应用船舶动界和领域模型以及应用领域缩放因子判断碰撞危险度的优势。

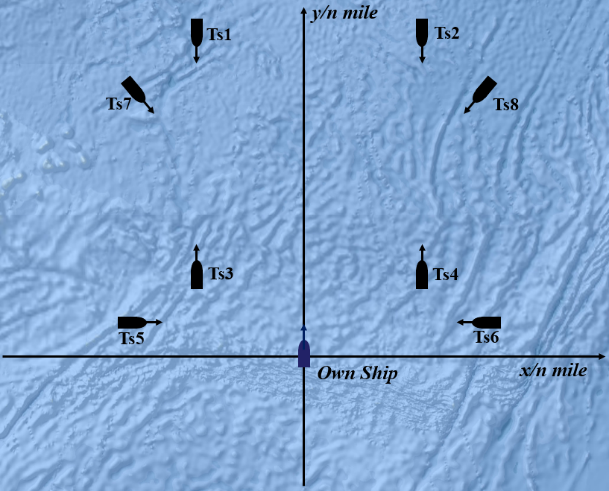


图5 船舶会遇态势标示图

通过应用我们提出的船舶领域模型与碰撞危险度计算方法，我们得到了图6所示的目标船危险度分析结果，与各目标船的碰撞危险度计算结果记录于表1中。该结果主要通过以下步骤得到。

* 通过设置的模拟场景获取位置、速度等船舶动态信息以及船舶基本参数，计算目标船船舶领域与动界模型参数，包括模型的半长轴与半短轴，半长轴偏移及半短轴偏移。
* 依据船舶领域与动界模型，计算本船运动相对于目标船领域的最小缩放尺度因子，并依据计算目标船碰撞危险度。
* 利用GIS的数据处理与图形绘制能力，在海图上构建目标船船舶领域与动界模型，流程主要包括领域模型的绘制，船舶领域的定位与定向，领域中心的位置偏移移动。
* 对目标船碰撞危险度进行标识，并将碰撞危险度以0.2为步长，并将会遇危险度为1或0的船舶单独标识，对目标船领域进行分级颜色展示，以便驾驶员直观判断会遇危险，提供决策支持。

表1 本船与目标船参数及危险度计算结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数 | OwnShip | Ts1 | Ts2 | Ts3 | Ts4 | Ts5 | Ts6 | Ts7 | Ts8 |
|  | 0 | 180 | 180 | 0 | 0 | 90 | 270 | 130 | 230 |
|  | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 船长/m | 160 | 100 | 100 | 120 | 120 | 200 | 200 | 180 | 180 |
| 坐标（n mile） | (0，0) | (-2，6) | (2，6) | (-2，2) | (2，2) | (-3，1) | (3，1) | (-3，5) | (3，5) |
| DCPA/m | / | 3704 | 3704 | 3704 | 3704 | 2619 | 2619 | 1122 | 1122 |
|  | / | 4.93 | 2.96 | 2.47 | 4.11 | 0.74 | 0.62 | 0.50 | 0.37 |
| TCPA/s | / | 1350 | 1350 | 3600 | 3600 | 900 | 900 | 1440 | 1440 |
| /s | / | 1050 | 1170 | 5040 | 6000 | 521 | 660 | 1257 | 1325 |
| CollioionRisk | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.32 | 0.27 | 0.96 | 1 |

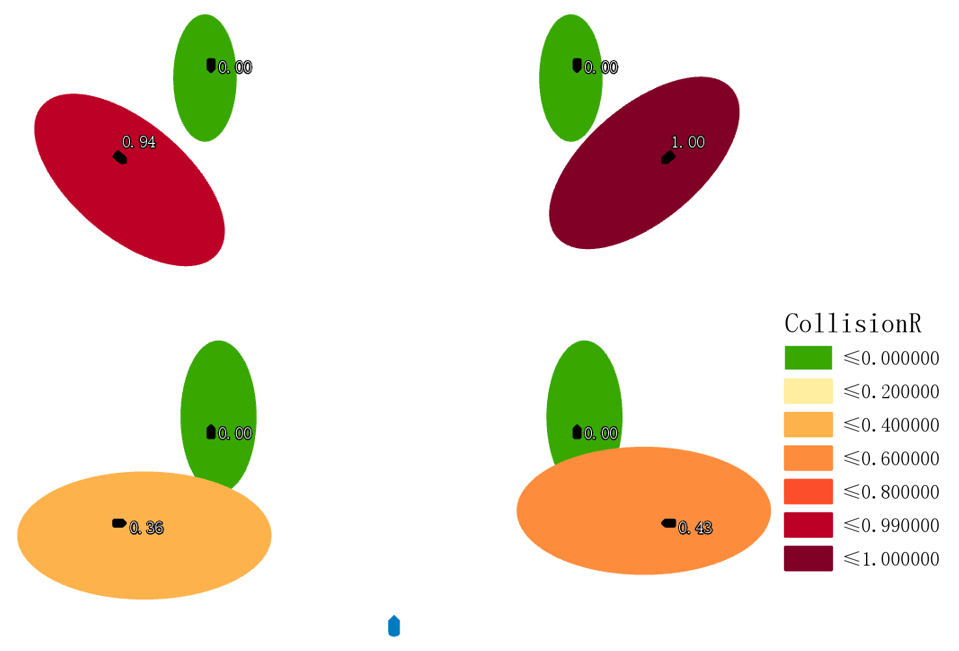


图6 目标船危险度分析结果

我们将这种新的碰撞危险度判断参数（，）与DCPA/TCPA进行对比，检验新的判断参数相对于DCPA/TCPA的优势。在对比方法上，由于是基于领域的缩放因子，其单位距离受到船舶动界大小，会遇角度，相对速度方向等多方面的影响，难以判断和衡量。我们选择将TCPA与进行对比，因为他们具有统一的单位，且意义都是本船到他船相对最小会遇点的时间，可以反映碰撞危险产生的紧迫性。我们用tRatio来表示两者的比值，并将它在GIS上做了可视化显示，如图7所示。



图7中标注的属性为TCPA/的值，通过对数据的对比分析，我们可以发现新的危险度判别参数相比于DCPA/TCPA的优势主要体现在以下方面。

* 当依据DCPA/TCPA判断两船的会遇危险一致时，依据，可以分析出这种对称情况的危险性差异。
* 基于船舶领域模型，不同方向上距离基准不同，具有各向异性。若目标船与本船呈对于或者交叉会遇，则依据的危险度判断结果更加敏感，若本船在追越目标船，则依据的危险度判断结果更加迟钝。这种危险判断更加符合航行实际情况。
* 由于是基于船舶动界模型计算的，对不同方向船舶的最短会遇时间具有缩放作用。两船会遇的TCPA越小，就会更加趋近于0。两船会遇的TCPA越大，的值也会相应的增大。这种差别更能反映会遇危险的紧迫与迟缓。



图7 TCPA与tmin的比较

### 4.PAD危险度可视化与评价

#### 4.1 PAD构建

PAD构建的主要目的是对未来一定时间范围内存在碰撞风险的海域范围进行显示，空间范围用船舶领域和动界进行表示，船舶领域作为不受他船侵犯的安全水域，对于他船而言，碰撞的危险度应取1，动界作为驾驶员感到他船碰撞危险的边界，其空间碰撞危险度应为0，在船舶领域和动界之间，碰撞危险度在[0，1]呈连续分布。时间范围主要用本船侵入和离开他船领域的时刻和进行构建。和有正负之分，若、为正，说明这一时刻对本船而言尚未到来，若、为负，说明这一时刻对本船而言已经过去。分析、对构建PAD的影响，主要包括以下3种情况：

* 并且，说明本船在过去时刻侵入他船领域并且在过去驶离他船领域，在这种情况下，不应将该船纳入PAD的构建之中。
* 并且，明本船在过去时刻侵入他船领域并且在未来驶离他船领域，在这种情况下，本船仍处于他船的船舶动界范围之中，应该取[0， ]的时间范围对PAD进行构建。
* 并且，明本船在未来时刻侵入他船领域并且在未来驶离他船领域，在这种情况下，应该取[， ]的时间范围对PAD进行构建。

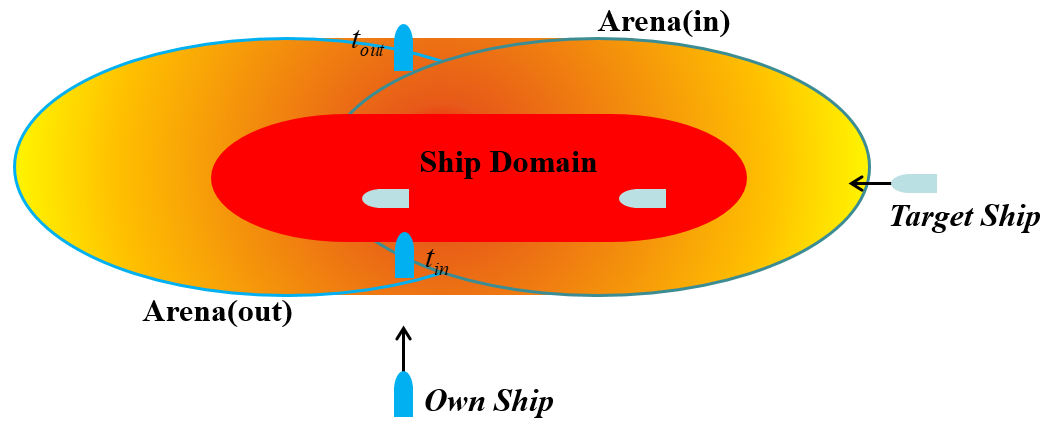


图8 两船危险会遇场景

具体的PAD构建方法如图8所示，若本船在时刻将会驶入他船动界范围，驶离他船动界范围，则相应的预测危险海域可用时刻的目标船动界范围、时刻的目标船动界范围以及该时间范围内的目标船航迹线及其影响区域进行连接。

为了确定碰撞危险度在船舶领域与动界之间的海域空间的分布状态，采取不同的GIS空间插值方式，对碰撞危险度进行插值并评价。由于当该构建方法应用于本船面对多船的情景，若两目标船的PAD区域产生了相交，该相交区域的对应边界已经成为PAD内部的一部分，不应对碰撞危险判断产生影响，在碰撞危险度空间插值构建以及评价的实验中，以本船与Ts6这一条目标船构建PAD。因此需要对多船会遇产生的PAD范围进行进一步合并，以确定可以描述碰撞危险度的真实边界。

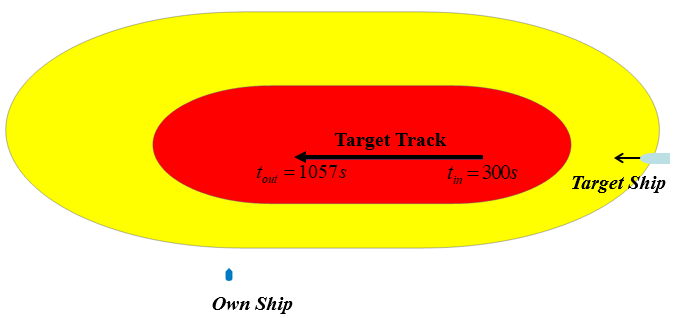


图9 PAD的创建

而在实际航海中，驾驶员不仅需要知道碰撞必然会发生的海域，还需要对整个海域的空间危险分布有直观的认识。在空间插值面的创建过程中，为了确定整个区域的危险度，首先必须确定的是一些关键位置的已知准确碰撞危险度值的点位，对PAD的构建进行支撑。在本研究中，我们把它称为插值关键点。插值关键点的数量与质量，会直接影响到插值的结果。我们认为船舶领域及其以内的范围碰撞危险度都为1，而动界的边界碰撞危险度为0。同时增加了两条中值线，分别为领域位置中值线和领域危险度中值线。其中，领域的半椭圆边界由400个点构成，连接两个半椭圆的多边形以20秒由船舶领域中心以及领域缩放程度换算到的边界位置，以保证有充足的、准确的点位进行空间插值，增加插值结果的准确性。我们构建了如图10所示的碰撞危险度插值关键点。

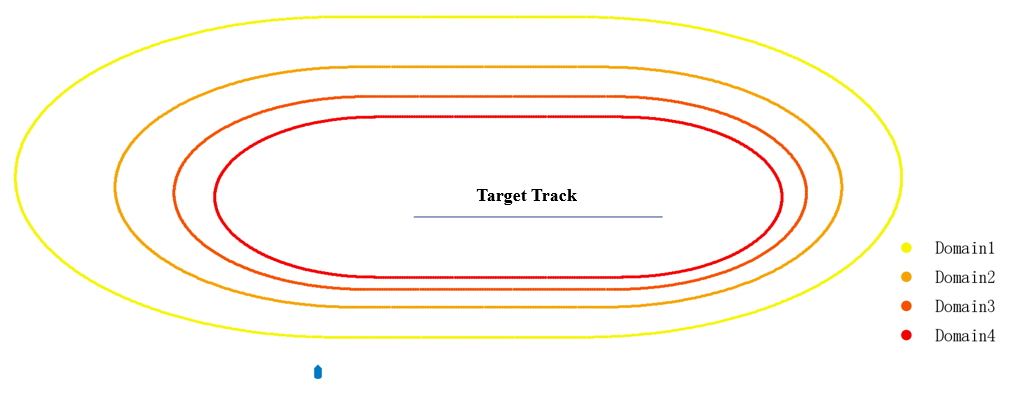


图10 插值关键点

图10中各个领域边界的缩放因子*f*以及危险度*u*如下所示：

* Domain1:f=1 ， u=0;
* Domian2:f=0.75，u=0.12;
* Domian3:f=0.60，u=0.5;
* Domian4:f=0.5.u=1.

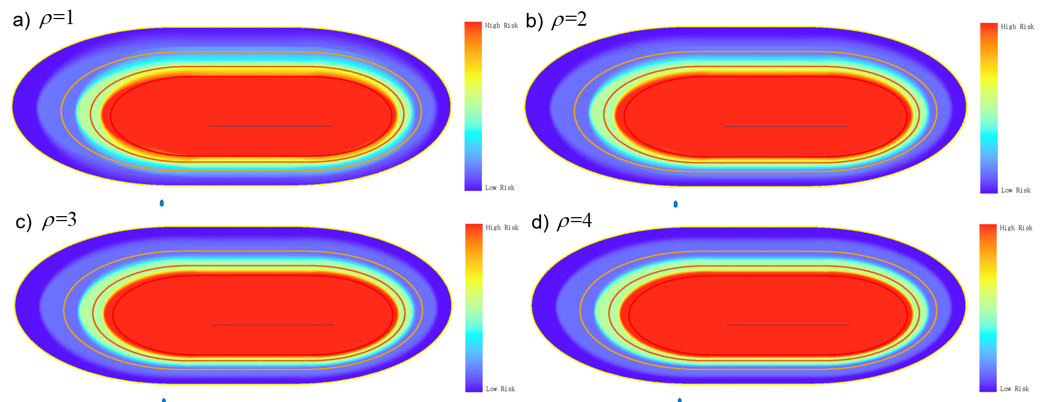
#### 4.2 插值方法介绍与插值结果

##### 4.2.1 反距离IDW插值法

反距离权重 (IDW) 的原理如公式5所示：彼此距离较近的事物要比彼此距离较远的事物更相似。当为任何未测量的位置预测值时，反距离权重法会采用预测位置周围的测量值。与距离预测位置较远的测量值相比，距离预测位置最近的测量值对预测值的影响更大。反距离权重法假定每个测量点都有一种局部影响，而这种影响会随着距离的增大而减小。由于这种方法为距离预测位置最近的点分配的权重较大，而权重却作为距离的函数而减小，因此称之为反距离权重法。



影响插值生成结果的主要参数是幂指数和样本数。权重与反距离的次幂成正比。因此，随着距离的增加，权重将迅速降低。权重下降的速度取决于值。如果=0，则表示权重不随距离减小，该点的预估值将为该点搜索邻域内所有插值关键点的平均值。随着值的增大，较远插值关键点的权重将呈指数趋势下降。在实际应用中，随着预估值点与插值关键点距离的增加，远距离的关键点对该估值点的影响会变得越来越小，为了优化计算方法，减少结果生成时间，需要设置一个搜索邻域，去除较远插值关键点的影响。搜索邻域内插值关键点的数量则是样本数的值，搜索邻域的确定方式通常为固定样本数或固定搜索距离两种。在本研究中，插值的关键点数量充足，且分布均匀，在经过前期试验后，确定船舶领域与动界之间的插值区域内估值点插值结果由该点500米以内的插值关键点共同确定。在第二章中，我们基于刺激-反应理论确定的碰撞危险度函数的幂指数为3.03，所以我们取幂指数为1，2，3，4的情况，分别生成其碰撞危险度插值结果图。



##### 4.2.2 克里金Kriging插值法

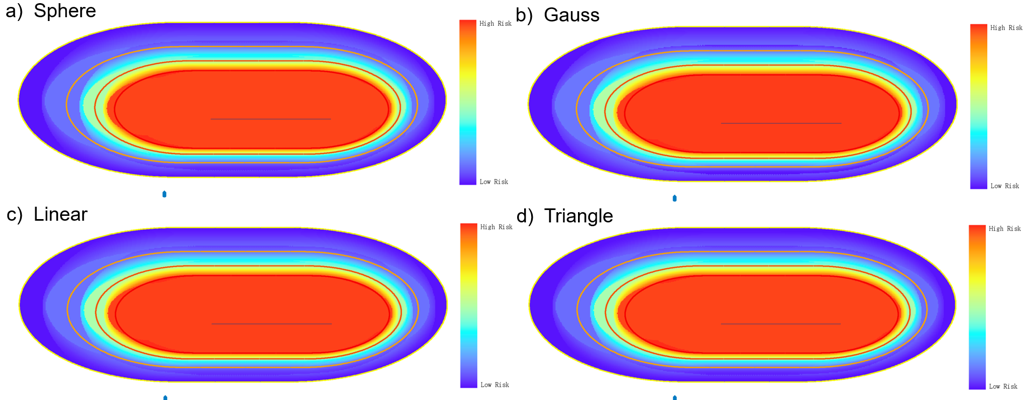
克里金插值是局部空间插值方法的一种，它利用空间中搜索邻域内的所有插值关键点值加权统计来对未知点值进行估计。其公式可以表示为。



在普通克里金法中，权重取决于插值关键点与估值点之间的距离和估值点周围的插值关键点之间空间关系的拟合模型，各个点所贡献的权重组合成使得插值结果各估值点的估计值与真实值相差最小的最优系数集合。的优化目标如公式所示.



克里金法需要创建变异函数和协方差函数以估算取决于自相关模型(拟合模型)的统计相关性(称为空间自相关)值。在普通克里金方法中，常用的经验半变异函数建模的函数包括：1）球面型；2）高斯型；3）线性；4）三角函数型，估值点的值会受到所选半变异模型的影响。为了确定不同半变异函数在本研究中的优劣，依据以上四种半变异函数，分别生成其碰撞危险度插值结果图。

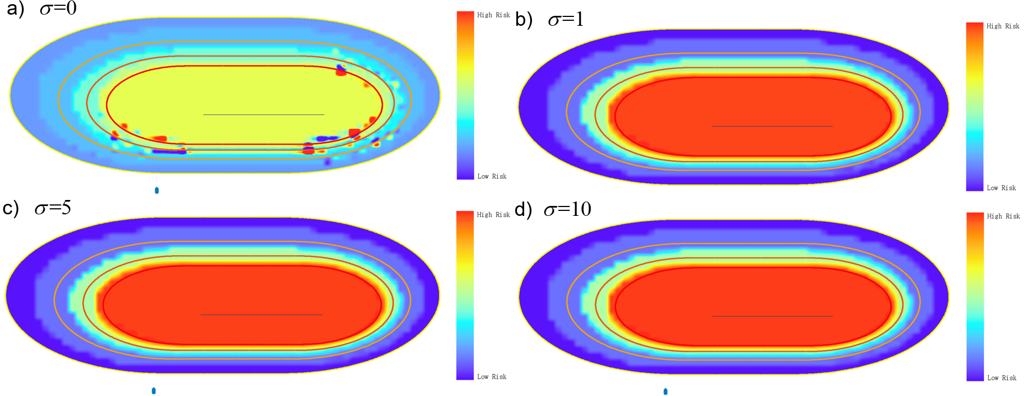


##### 4.2.3 样条Spline函数插值法

样条是一类分段光滑，并在各段交接处也有一定光滑性的函数。样条函数法工具所使用的插值方法使用可最小化整体表面曲率的数学函数来估计值，以生成恰好经过输入点的平滑表面。在曲线光滑算法的选择中，张力样条函数有着既可以生成光滑的样条曲线，也可以形成 分段的线性函数的显著特征，可以用它曲线不能通过已知结点与相邻曲线相交的现象。张力样条函数是Schweikert为消除三次样条插值函数有时会出现多余的拐点而引入的[4]。其基本构思是分段插值函数为直线插值和两个双曲函数和的线性组合:

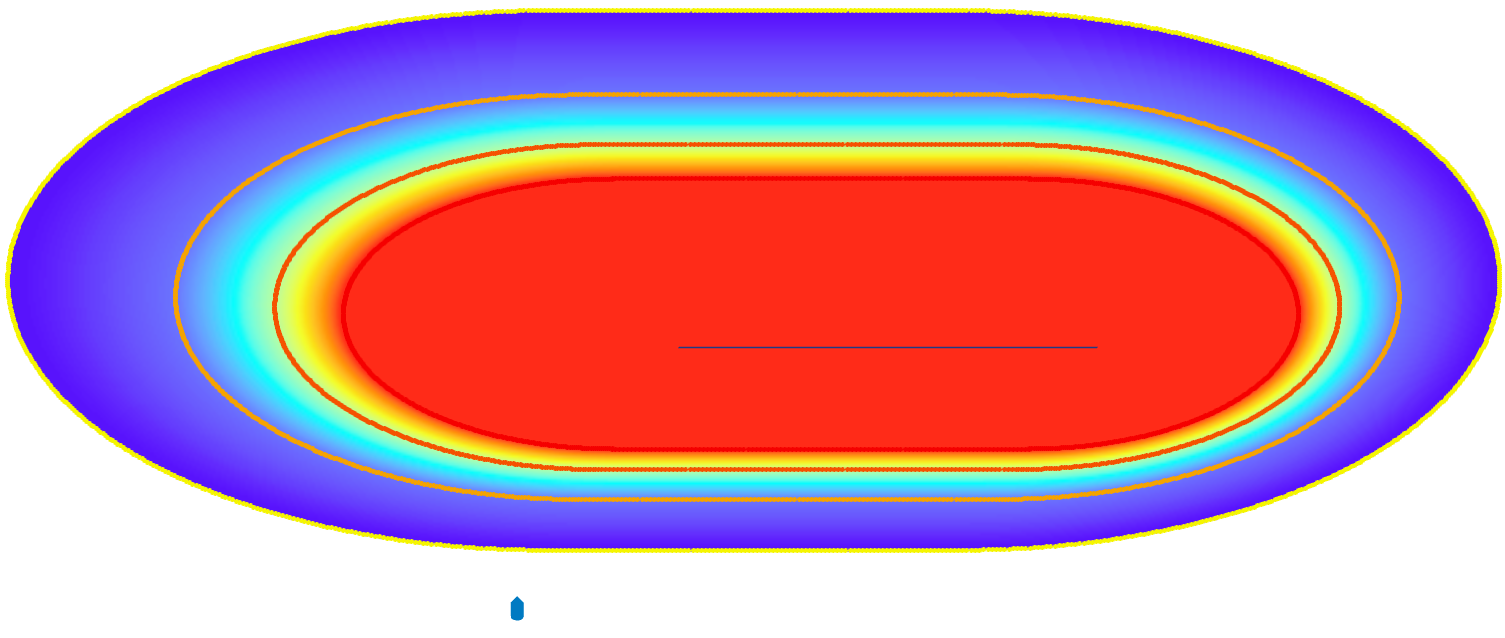


式(1)中，为张力系数，其作用是控制拐点的位置和曲线的形态[5]。当时，张力样条函数就等同于三次样条函数，当时，则它退化成分段线性函数，即不同的转折点之间通过线性方式进行连接[3]。因此，值决定了最终插值结果的变化趋势。我们对分别为0，1，5，10的4种具有显著性的进行了碰撞危险度插值结果图的生成，结果如下图所示。



##### 4.2.4 自然邻域法

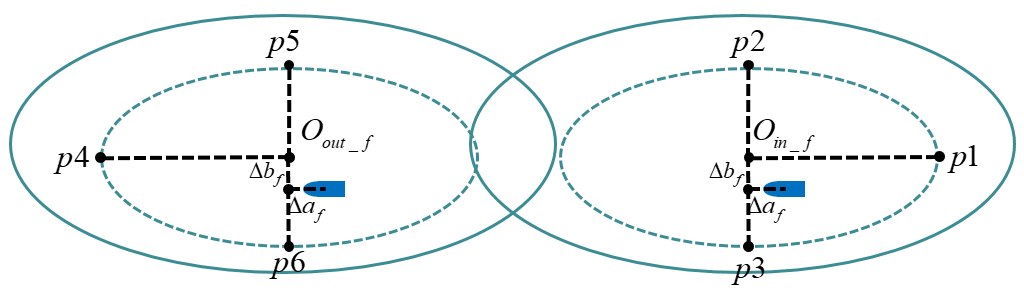
自然邻域法插值可找到距查询点最近的输入样本子集，并基于区域大小按比例对这些样本应用权重来进行插值（Sibson，1981）。该插值也称为 Sibson 或“区域占用 (area-stealing)”插值。该插值方法的基本属性是它具有局部性，仅使用查询点周围的样本子集，且保证插值高度在所使用的样本范围之内。该表面将通过输入样本且在除输入样本位置之外的其他所有位置均是平滑的。该插值方法根据输入数据的结构进行局部调整，而无需来自用户的与搜索半径、样本计数或形状有关的输入。对于规则和不规则分布的数据，它的效果一样好（Watson，1992）。利用该方法生成如下图所示的碰撞危险度插值结果图。



#### **4.3 插值结果评价**

##### 4.3.1 评价点位构建

为了分析插值结果的优劣，需要构建一系列位置固定、空间碰撞危险度已知的评价点集，对上述插值结果进行评价。在本文中，通过预测，时刻目标船的位置，确定评价点集构建的中心。在此中心上，分别构建的椭圆，并确定其半长轴和半短轴的端点，将其加入评价点集中。其具体构建方式如下图所示。



图中，和分别为，时刻领域缩放因子为下的椭圆中心，其相对于船舶位置的半长轴偏移与半短轴偏移分别为，。各领域中心相对于的位置可以表示为：





通过对椭圆公式进行解算，在该领域缩放尺度下可以生成6个评价点，构成了该缩放因子下的评价点集。通过解算在尺度下的领域中心距离领域边界的距离，可以得到6个评价点位的具体位置。在该点集中，空间碰撞危险度通过第二章中的计算方法算出，随领域缩放因子的变化情况如图所示。

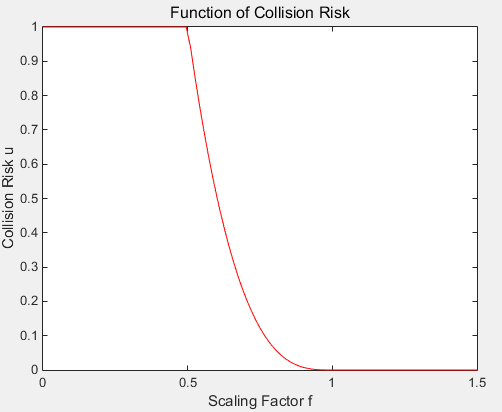
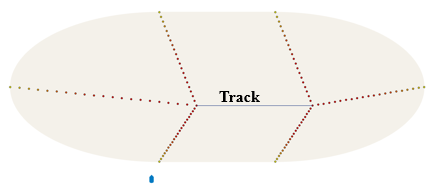


图4 碰撞危险度变化函数

最终生成的各个领域缩放尺度下的评价点集集合如图所示。



##### 4.3.2 评价结果分析

本研究采用双线性插值的方式，将评价点周围空间的碰撞危险度估计值提取至评价点，首先将各种方法的获取的估计值与实际值进行对比。

采用平均绝对误差（mean absolute error,MAE），均方根误差（root mean squared error,RMSE），拟合优度（R Square,R2）和平均相对误差（mean relative error,MRE）作为空间碰撞危险度插值结果的评价指标。平均误差总体反映估计值误差的大小，MAE可以可反映估计值可能的误差范围，RMSE反映估计值的灵敏度和极值效应，MRE能更直观地反映出测量值与计算值的差距。MAE,RMSE,MRE值约小，表示空间碰撞危险度插值误差越小，精度越高，模拟效果也越好。拟合优度接近1说明拟合结果接近实际值，模型良好。





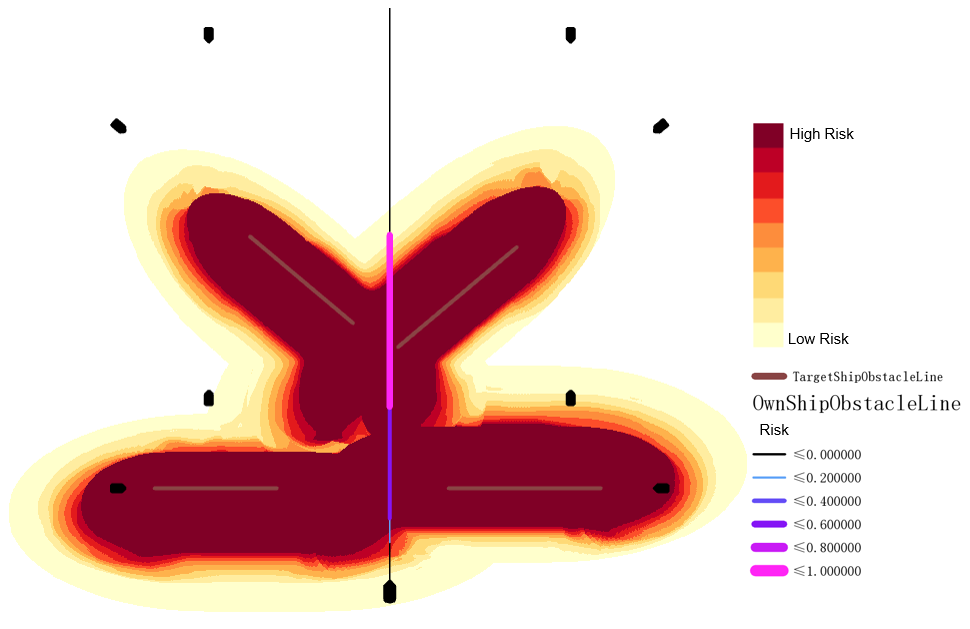




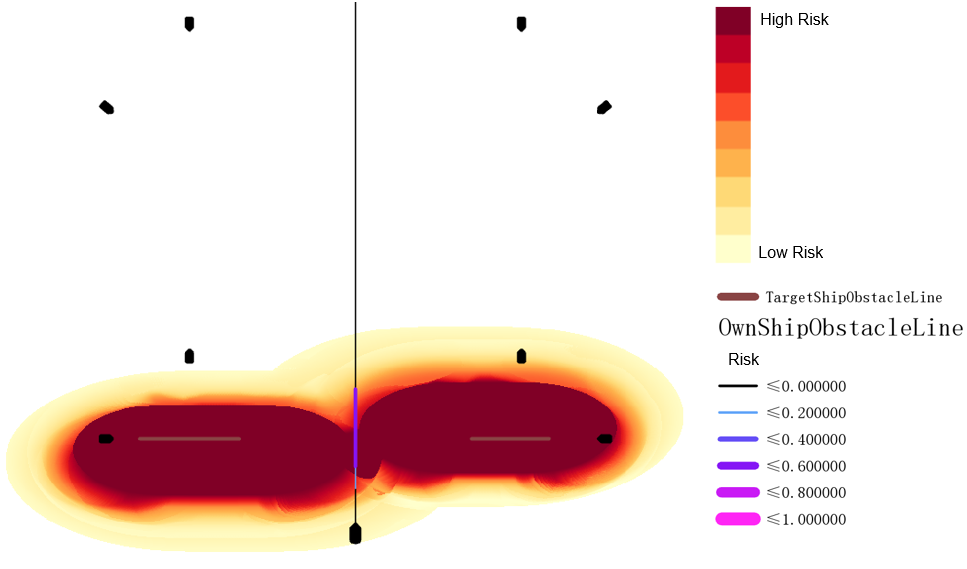
式中，和分别表示危险度实际值，危险度实际平均值与估计值，表示评价点的数量。

### 5.模拟场景应用

通过第四章的对各插值结果的误差分析，最终选用普通克里金方法，半变异函数采用三角函数型。并将该方法应用于模拟会遇场景中，该方法可以有效解决多船领域交汇，危险度难以判断的问题。



图中表示若本船按照当前的航向与航速行驶，在未来的时间内有会遇危险的海域。除此之外，还可将产生此危险的目标船航迹线进行显示。并且将本船在各个航行区间的碰撞危险进行显示。同时，为了可以聚焦短时间内的风险，我们设计了一个时间过滤器。该过滤器可以通过设置时间阈值的方式对结果进行进一步过滤。下图展示了时间过滤器设置为12分钟时的过滤结果。



### 6.结论与展望

### 参考文献

UNCTAD， 2018. Review of Maritime Transport 2018. United Nations Publications， New York

天津水域水上交通事故统计分析和对策研究

海上船舶碰撞、搁浅危险监管方法研究的现状与展望

Computer program for collision avoidance and track keeping: Conference on mathematical aspects on marine traffic

船舶碰撞危险度的新模型

Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces

IMPROVEMENT OF THE ANTI-COLLISION METHOD "VELOCITY OBSTACLE" BY TAKING INTO CONSIDERATION THE DYNAMICS OF AN OPERATING VESSEL

Coldwell TG. Marine traffic behaviour in restricted waters [J]. Journal of

Navigation， 1983， 36: 431-444.

A Unified Measure Of Collision Risk Derived From The Concept Of A Ship Domain

ｃｏｍｐｕｔｅｒｓｉｍｕｌａｔｉｏｎｏｆｍａｒｉｔｉｍｅｔｒａｆｆｉｃ

ｕｓｉｎｇｄｏｍａｉｎｓａｎｄａｒｅｎａｓ

Multi-target collision avoidance route planning under an ECDIS framework

COLDWELL T G. Marine traffic behaviour in restricted waters[ J] .Journal of Navigation， 1983， 36:431-444.

KIJIMA K ， FURUKAWA Y.Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area[ C] Proceeding of IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft.Girona， Spain:Elsevier Science， 2003:35-40

An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain[ J] .Journal of Navigation， 2010，63(4):733-749

孙家旭. 样条函数与计算几何 [ M] . 北京: 科学出版社， 1982.

Stevens S S. The Surprising Simplicity of Sensory Metrics[J]. Am Psychol， 1962， 27 : 29-39.