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。

1. 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、圆形、矩形以及智能方法获取的不规则图形等。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，灵活性强的优点。因此，本文选择Szlapczynski提出的椭圆形领域，该领域满足COLREGS规则的要求（IMO，1972； Cockcroft和Lameijer，2011），因为它将船舶领域的中心放在领域的左下部分，反映了驾驶员对碰撞风险的感知。In practice this is enough to make a domain compliant with COLREGS by favouring passing astern and manoeuvres to starboard, while reflecting navigator's perception of collision risk.

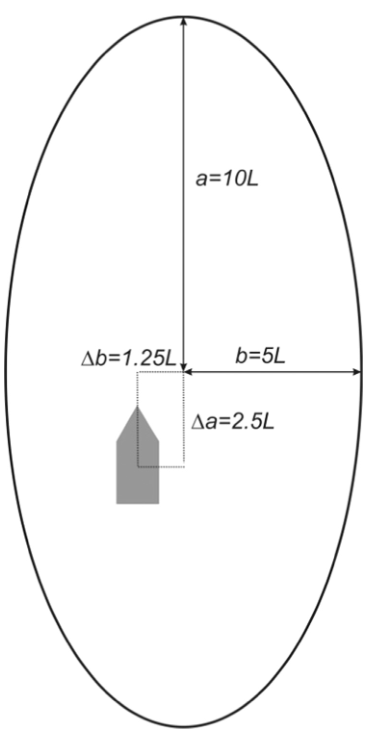
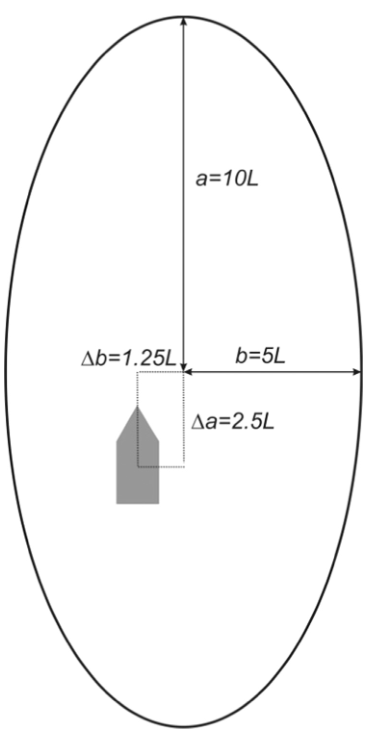
 

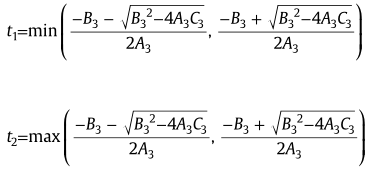
图1 船舶领域模型 图2 领域与动界模型

若目标船舶驶入该领域内，则认为有极大概率会发生船舶碰撞。除此之外，还应该确定一个领域范围，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，即空间危险度零边界。郑中义（船舶空间碰撞危险度的概念及其模型）通过调查与观测，在考虑了的情况下，认为空间危险度零边界应为安全会遇距离的2倍。依据该理论，我们建立了图2所示的动界模型。

2.2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的，简单的安全措施，用approach factor *f*作为DCPA的替代，表示对于给定的接近目标物体情况，在两艘船之间的距离小于某个给定阈值距离的时间内，本船临时接近因子所达到的最小值。在本文中，表示本船侵入目标船动界的程度，t1和t2表示本船侵入目标船动界的起始与终止时间，计算方法可由公式1，2表示。

（1）

 （2）

如图3所示，式1中表示本船到目标船船舶领域中心的距离，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。式2中，A3,B3,C3是求解椭圆领域一元二次方程的复杂中间变量，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共同确定。

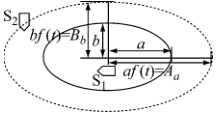
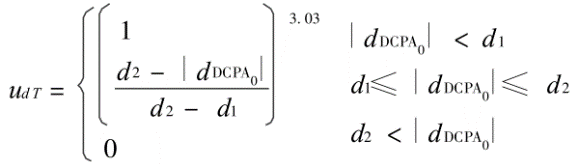


图3 缩放因子示意图

通过该计算方法得到的领域侵入程度并不能直接表示碰撞危险度，郑中义在考虑多种因素对空间碰撞危险度影响的前提下，基于刺激-反应的理论，认为空间碰撞危险度主要是依靠视觉从海上或从雷达上确定的，光变化的心理感应强度是0.33 ,是随光强度的增加而变化的 ,因此为适宜于本船确定的空间碰撞危险度 ,在本文取 n = 1/0. 33= 3. 03，给出了空间碰撞危险度模型。（要不要加时间危险度的判断方法）

 (3)

式3中，表示目标船与本船初始时刻的DCPA值，表示最小安全会遇距离，表示空间危险度零边界。依据他的研究成果，本文确定了基于领域缩放因子的危险度的计算方法。图4是碰撞危险度随领域缩放因子的变化情况。

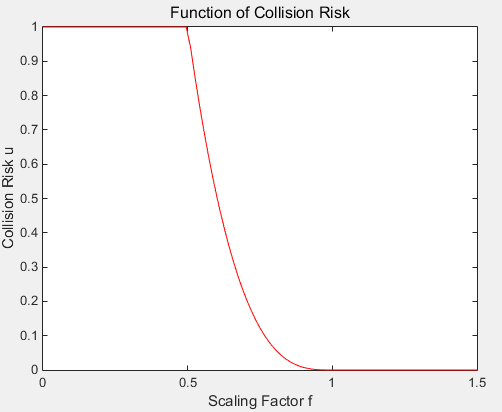


图4 碰撞危险度变化函数

1. 当前碰撞危险判断与显示

GIS在航海领域的应用主要体现在ECDIS系统中，ECDIS(Electronic Chart Display and Information System)是一种新型的船舶导航与辅助决策系统。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，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AIS数据在图5与表1进行展示，我们设计了若干目标船DCPA计算结果一致的情况，验证在传统碰撞危险度计算结果一致的情况下，应用领域缩放因子判断碰撞危险度的优劣性。

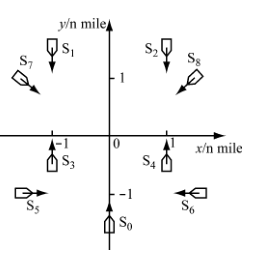
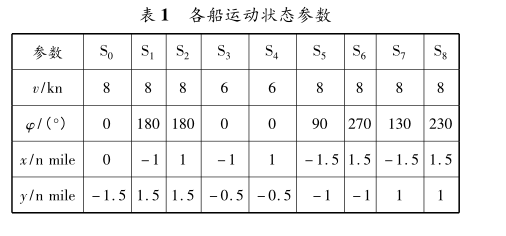


图5 船舶会遇态势标示图



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。该结果主要通过以下步骤得到。

* 通过AIS获取目标位置、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，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。

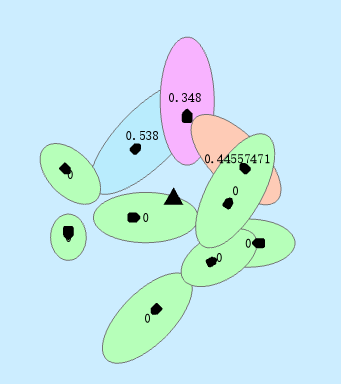
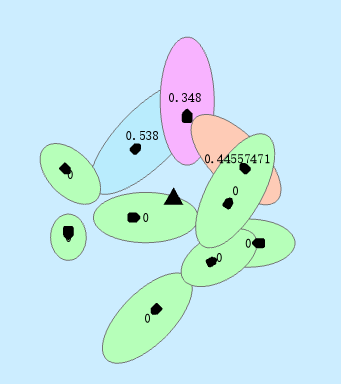
 

图6 目标船危险度分析结果 图7 DCPA与f的比较

最后，如图7所示，我们对DCPA与f进行了对比，发现在DCPA相同的特殊会遇情况下，领域缩放因子f依然有良好的变化梯度，证明了缩放因子的优势。

1. PAD危险度可视化与评价

4.1 PAD构建

在计算领域缩放因子的过程中，我们计算了本船侵入目标船的时间范围TDV，若两解t1、t2一负一正，可理解为目标船 在过去的 t1 时刻入侵本船领域，在t2时刻驶出本船 领域;若t1、全为正值，可理解为目标船在t1时刻 入侵本船领域，在t2时刻驶出本船领域。基于这个时间范围，我们可以借助船舶领域与动界模型将两船具有碰撞危险的海域进行显示。

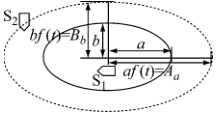


图8 两船危险会遇场景

基于这个思想，我们将与本船具有会遇危险的目标船，在起始时刻与终止时刻的位置进行了解算，并创建了该时间范围内的航行影响区。最终将这些要素进行了合并，去除了其内部无用的冗余点，利用要素构建的关键点创建了PAD。

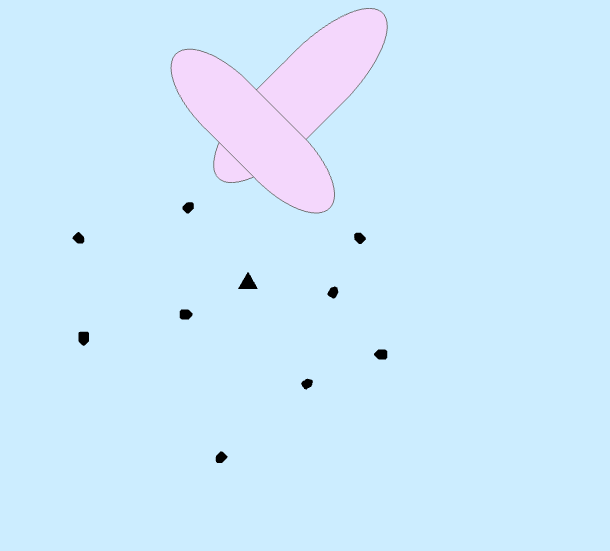


图9 PAD的创建

在之前的研究中，没有引入动界概念，只运用的最小会遇安全距离创建碰撞危险度为1的PAD模型。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。因此，我们基于动界模型，运用GIS的空间插值方法，探究了碰撞危险度在碰撞危险海域从零到一的变化情况，细化碰撞危险度的空间分布，使其具有空间连续性。在空间插值面的创建过程中，为了确定整个区域的危险度，需要一些已知碰撞危险度的点位进行支撑，在本研究中，我们把它称为插值关键点。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。主要探究碰撞危险度在船舶领域与动界之间的分布情况。因此，我们构建了如图10所示的碰撞危险度插值关键点，动界边界危险度为0，而领域内部进行要素面转点并赋值危险度为1，进行空间插值。

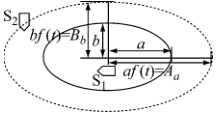
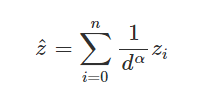


图10 插值关键点

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。



其主要影响参数是幂指数p和样本数n。如图11所述，权重与反距离（数据点与预测位置之间）的 p 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 p 值。如果 p = 0，则表示权重不随距离减小，且因每个权重 λi 的值均相同，预测值将是搜索邻域内的所有数据值的平均值。随着 p 值的增大，较远数据点的权重将迅速减小。如果 p 值极大，则仅最邻近的数据点会对预测产生影响。而对n的优化设计在于随着位置之间的距离增大，测量值与预测位置的值的关系将变得越来越不密切。为缩短计算时间，可以将几乎不会对预测产生影响的较远的数据点排除在外。因此，通过指定搜索邻域来限制测量值的数量是一种常用方法。

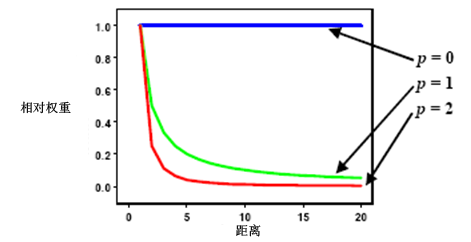
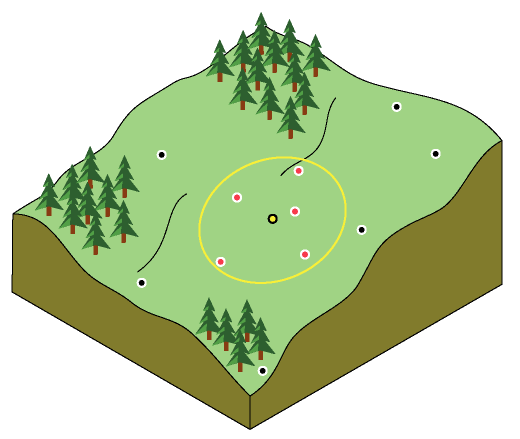
 

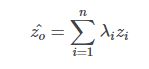
图11 幂指数影响 图12 邻域范围影响

在本研究中，由于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PAD内部每个栅格像元由12个最邻近关键点共同经过反距离插值运算确定。在本实验中，由于我们确定的危险度分布函数的幂指数为3.03，所以我们取幂指数3以下的4种情况，即幂指数为0,1,2,3的情况，分别生成其PAD内部碰撞危险度分布状态图。

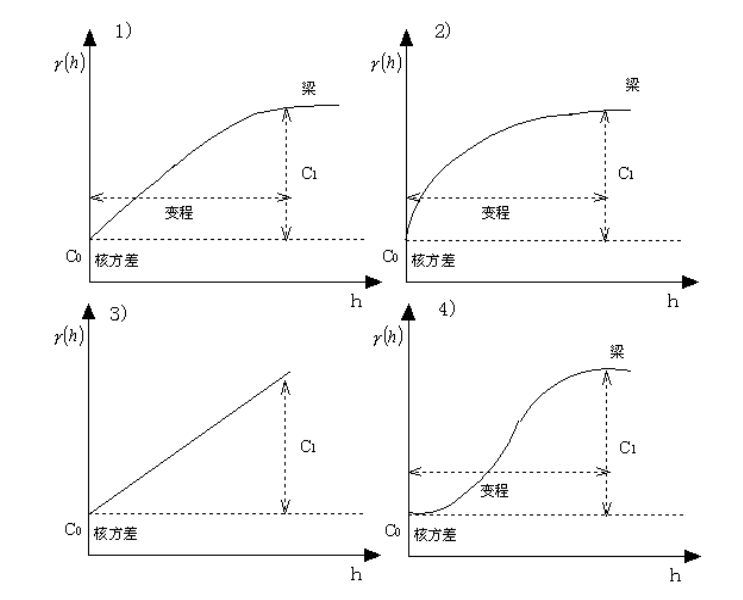
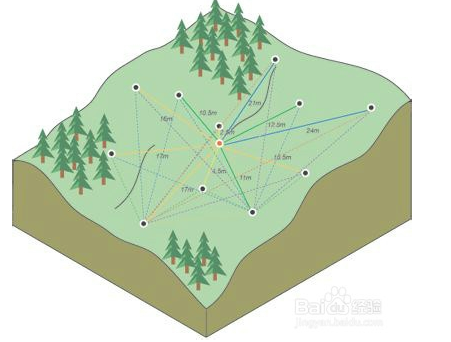


### 4.2.2 克里金Kriging插值法

相比反距离插值，克里金插值更加抽象。其公式可以表示为

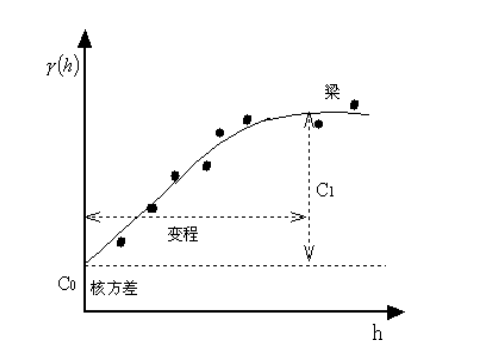


其中zo^是点(xo,yo)处的估计值，即zo=z(xo,yo)。它同样是用空间上所有已知点的数据加权求和来估计未知点的值。但权重系数并非距离的倒数，而是能够满足点 (xo,yo)处的估计值 zo^与真实值 zo的差最小的一套最优系数。在普通克里金法中，权重 λi 取决于测量点、预测位置的距离和预测位置周围的测量值之间空间关系的拟合模型。克里金法需要创建变异函数和协方差函数以估算取决于自相关模型(拟合模型)的统计相关性(称为空间自相关)值。克里金法工具提供了以下函数，可以从中选择用于经验半变异函数建模的函数：圆 ;球面 ;指数 ;高斯 ;线性 ; 所选模型会影响未知值的预测，尤其是当接近原点的曲线形状明显不同时。接近原点处的曲线越陡，最接近的相邻元素对预测的影响就越大。这样，输出曲面将更不平滑。每个模型都用于更准确地拟合不同种类的现象。











延迟h的值较大的部分曲线呈水平方向。曲线的水平部分称为梁。说明在延迟的这个范围内数据点没有空间相关性，因为所有的方差不随距离增减而变化。曲线从y(h)的低值升到梁为止的延迟范围，称为变程。变程是变方差图的最重要部分，因为它描述了与空间有关的差异与距离之间的变化趋势。各种半变异函数的选取取决于核方差与梁的明显性，变程的形状等因素。本研究生成了不同半变异函数的碰撞危险度插值结果图，用于后期对比。



### 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,这样可以用它克服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 shσ x 和 chσ x 的线性组合:

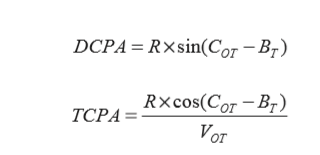
　f(x)= c1 +c2 x + c3 shσ x+c4chσ x (1)

式(1)中,σ为张力系数。式(1)整体具有连 续二阶导数,σ的作用是控制拐点的位置和曲线 的形态[5] 。当 σ→0 时,张力样条函数就等同于三次样条函数,当 σ→∞时,则它退化成分段线性函数,即从节点到节点是折线连 结[3] 。因此,根据实际需要动态选择合适的σ值, 使点与点之间的曲线尽量缩短,这样既能消除可 能出现的多余拐点,又能保持曲线的光滑性。我们对4种具有显著性的σ进行了碰撞危险度的生成，分别为0，1,5,10，并用于后期评价。

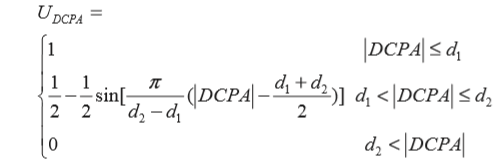


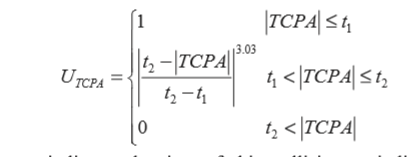
4.3 PAD评价

为了对构建的PAD内部碰撞危险度插值结果进行评价，我们依据DCPA/TCPA建立了离散标准碰撞危险度评价点。DCPA/TCPA被广泛应用于判断船舶碰撞风险。其公式为

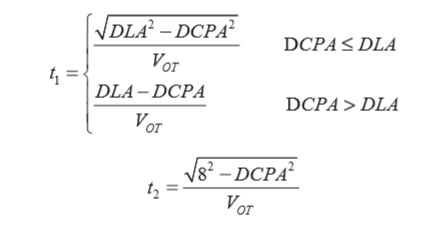


现在较为常用的基于DCPA/TCPA的危险度判断方法为考虑了当前几种典型评价模型的思想和方法[6]，并确定了使用模糊隶属度来构建船舶碰撞风险的模糊评价模型。 本文选择DCPA，相对距离（R），TCPA，和速度比K（/ OT K VV =）作为 评价的主要因素。 其中，R和DCPA的隶属函数反映了空间碰撞风险； TCPA的隶属函数反映了时间冲突风险。 它们从几何关系的角度反映了两艘遭遇战舰的风险。





t1表示船舶相撞的时间； t2表示关注目标船的时间。 通常认为船舶之间的6-8海里是船舶的自由行驶阶段，为了安全起见，本文将8海里设置为开始形成碰撞情况的船舶之间的距离。 然后，我们将两船之间从8海里航行到最近的进近点所需的时间设为t2。



2.构建评价点

3.插值结果展示与评价

1. 结论
2. 展望与不足
3. 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.