

基于船舶时空动态航迹大数据的飓风影响分析

——以美国“桑迪”飓风为例

摘 要

本文主要研究飓风对船舶时空分布的影响，得出受影响船舶的数量，绕避方式和绕避成本。

【问题一】在模型一中，分别从航行状态和停泊状态两个方面分析受飓风影响的船舶数量，然后得出了总的受影响船舶数量。首先，基于船舶受飓风影响及其相关定义，筛选出了航行状态中的船舶数量和停泊状态中的船舶数据。然后，对于航行状态中的船舶，得出相同时刻，船舶和飓风中心的地理位置与飓风的影响范围，通过比较船舶到飓风中心的距离和飓风的影响半径，得到了在航行状态中受飓风影响的船舶数量；对于停泊状态中的船舶，针对每个航次号，求取了船舶数量最多的时刻的船舶数量和最后时刻的船舶数量的差值，作为每个航次号被飓风损毁的船舶数目，对其求和得到了停泊状态中受飓风影响的船舶数量。最后，得出结果，受飓风影响的船舶数量为2361。

【问题二】将分析对象限制在受到飓风影响且能够做出绕避行为的船舶数据上，即问题一中求解模型得到的处于航行状态且受到飓风影响的船舶数据。基于聚类分析的原理，给出船舶异常状态的定义以及绕避行为的分类依据，并结合数据将绕避行为分为三类：继续航行但绕开飓风，暂停航行，继续航行且不绕避飓风。相应地，将船舶进行绕避行为归类，得到结果。

【问题三】将分析的对象限制为问题二模型求解得到的船舶的按照绕避方式分类的数据，结合给出的绕避成本（额外航行距离及绕避时间）的定义，给出成本计算公式： $T_{rb} = t_{rb,fin} - t_{rb,fir}$ 以及 $S_{rb} = \sum_i \|PS(t_{rb,i+1}) - PS(t_{rb,i})\|$ 。相应地，求出船舶的绕避成本并进行了合理性分析。

利用元胞自动机原理建立模型检验以上模型的正确性与实用性。

关键词： 绕避行为；聚类分析；元胞自动机；参数矩阵化

一 问题重述

1.1 问题背景

在国际经济贸易蓬勃发展的当下，海运凭借其强大的运输能力和低廉的价格，成为各国进行大宗货物贸易时首选的运输方式。随着贸易量和贸易额的持续增长，海上运输的安全性越来越受到各国企业的重视，对海上自然灾害预防的研究也不断展开。

具有代表性的海上自然灾害是热带气旋（在中国传统上称为台风、美国称为飓风，本文以下简称“飓风”），是发生在热带或副热带洋面上，具有有组织的对流和确定气旋性环流的非锋面性涡旋的统称，其中心的极低气压和云墙区大风，极端情况下能使海面产生高达十米甚至以上的风浪和涌浪，对海上航船的安全造成极大的威胁。

2012年10月份“桑迪”飓风给美国带来巨大的损失。船舶为了避免或减轻飓风带来的损失，会根据预报及实时飓风信息进行绕避。但绕避行为在降低飓风本身对船舶影响、减轻飓风损失的同时，也会产生额外的航行或停泊时间，以及额外的航行里程等，造成相关成本的增加。

1.2 已知数据

1. 2012年美国桑迪飓风路径数据，提供了2012年10月21日18时到10月31日12时之间桑迪飓风中心的移动轨迹。

2. 2012年10月18-31日桑迪飓风风场数据，提供了飓风在该时期内的空间范围和风场强度的空间分布。

3. 桑迪台风影响区域及时段内船舶航迹数据，提供了2012年10月18日0时到11月1日0时在桑迪飓风影响范围的船舶航迹数据。

1.3 问题概括

研究的问题以2012年10月18日至31日“桑迪”飓风影响期间为时间背景，通过对美国东南沿岸地区船舶航迹点的分布及飓风路径及飓风风速空间分布（风场）的调查，建立起实际情况的模拟，旨在找到不同地点的受飓风影响程度大小不同船舶的避让行为模式及时空规律，求出绕避行为的实施成本。为了完成这个目标，需要解决的问题如下：

1. 通过对美国东南沿岸地区船舶航迹点的分布、飓风路径和风场的调查，判断受到桑迪飓风影响的船舶数量。
2. 对船舶在飓风中的绕避方式进行分类。
3. 设计一个计算方法，得出船舶实施不同绕避行为的相关成本。

二 问题分析

本文分别分析处于航行状态和停泊状态的船舶的运行状况，建立模型，求出受飓风影响的船舶数量；基于受飓风影响的船舶状态对船舶的绕避方式进行分类，然后根据分类定义船舶绕避成本。最后通过元胞自动机检验模型的准确性。

2.1 问题一

首先给出船舶受飓风影响的定义及相关定义，根据定义筛选出相应的船舶状态，将船舶划分为可能受影响和不受影响两类，筛选出可能受影响的船舶数据。为了方便计算，我们从航行状态中受到飓风影响和停泊状态中受到飓风影响两个方面进行建模，求解受飓风影响的船舶数量。考虑到这两种情况，我们进一步将数据分为航行状态中的和停泊状态中的船舶数据。

- 对于处于航行状态的船舶。算出各时刻飓风的影响半径范围，判断同一特定时刻船舶与飓风路径点位置的距离是否小于该半径定值，大于该定值的即没有受到影响，小于该定值的即受到影响，并以航次号区分船舶的依据，从而得到实际受桑迪飓风影响且未被损毁的船舶数量。
- 对于处于停泊状态的船舶。由于不同船舶可能共享同一个航次号的情况，我们求出拥有相同航次号船舶数量最多的时刻及其船舶数量。针对这个航次号，用数量最多时刻与最后时刻的船舶数量的差值表示实际受桑迪飓风影响的船舶数量。

最后，将处于航行状态和停泊状态的船舶受到飓风影响的数量求和，即可得到受到飓风影响的总数量。

2.2 问题二

我们将分析对象限制在需要对飓风进行绕避行为的船舶上，即问题一中求得的在航行状态中受桑迪飓风影响的船舶数据。给出船舶异常状态的定义，按船舶的异常状态情况分析数据分布，对船舶的绕避方式进行分类。

2.3 问题三

我们给出额外航行距离及绕避时间的定义，借助问题二求得的船舶的绕避方式分类数据，可直接计算得到相应结果。

三 符号说明

表格 1 符号说明

符号	说明
t	标准化时间
t_0	某一标准化时间
ID	航次号
ID_0	某一航次号
$PT, PT(t)$	飓风轨迹点的风场矩阵位置
$PS, PS(t, ID)$	船舶的风场矩阵位置
$//, .//$	风场矩阵中元素的地理距离
W	风场矩阵
$A, A(ID, t)$	船舶状态矩阵
$R, R(t)$	飓风位置矩阵
$R_0, R_0(t)$	风场影响半径

$PTlat, PTlat(t)$	飓风中心的经度
$PTlon, PTlon(t)$	飓风中心的纬度
$PTco, PTcol l(t)$	飓风中心相对风场矩阵的列数
$PTrow, PTrow(t)$	飓风中心相对风场矩阵的行数
Δ	风场经度（纬度）间隔
$MAXN(ID)$	最大船舶数量
$LASTN(ID)$	最后时刻船舶数量
$N(ID):$	被损毁的船舶数量
σ	停泊状态受飓风影响的船舶数量
M	所有停泊状态中的船舶集合
$B(ID)$	船舶危险区判断矩阵
T_{rb}	绕避时间
t_{rb}	船舶绕避过程中的时间
$t_{rb, fir}$	该船绕避行为开始时刻
$t_{rb, fin}$	绕避行为结束时刻
S_{rb}	绕避距离

四 模型假设

- 假设在飓风模拟风场中不为0的位置，均为飓风的影响范围，且不为0的位置均是连续分布。
因为飓风的影响是连续地向四周辐射开去，所以随着与飓风中心距离的增加，一旦有位置出现0，则说明该位置已处于影响范围外。
- 假设某一时刻的风场作用区域是一个圆形，强度以飓风中心为圆心。
- 假设处于停泊状态的船舶，在飓风的影响下只有被摧毁的结果，否则称为是不被飓风影响的。被摧毁的船舶不能继续发出信号。
- 假设船舶在某一小时内的绕避行为与相应的测定时刻的绕避行为一致。
- 假设不存在状态11与状态12、1、8占比相同的情况。¹

五 相关定义和数据预处理

5.1 相关定义

在进行数据预处理之前，我们针对题目的问题给出明确的定义。

定义 1 影响：飓风的对船舶的直接物理作用导致船舶的状态发生改变的行为。因此，飓风对停泊状态中的船舶的影响只有使其停止发送信号或否的结果。

定义 2 绕避行为：船舶在航行过程中，为了应对飓风而采取的措施，分为继续航行但绕开飓风，停泊和不绕避三种绕避行为。

¹ 详见问题二7.1.3.

定义 3 船舶异常状态：船舶在航行过程中，由于受到飓风影响，而处于的超出正常航行计划外的状态。简称异常状态。

定义 4 危险区：以飓风中心为圆心，半径为300海里^[1]的圆形区域范围。

绕避成本：由于飓风的影响，船舶的原定航行路线以及航行时间是未知的，因此需要对额外航行距离，绕避时间以及相关的内容给予明确的定义。

定义 5 额外航行距离：船舶从进入异常状态到结束异常状态所航行的地表距离。

定义 6 绕避时间：船舶从进入异常状态到结束异常状态所消耗的时间。

5.2 数据预处理

在建立模型之前,我们首先对题目提供的数据进行如下预处理：

- 将时间进行标准化处理。
- 将飓风轨迹数据进行连续化处理。
- 将位置数据风场矩阵化。
- 对船舶数据进行初步筛选。

5.2.1 时间标准化处理

将时间进行标准化处理，即以2012年10月21日18时为标准0时间，以1小时为标准时间单位，将原来的时间数据转化为标准时间，非整时数时间向下取整，得到所有数据的时间标准化版本。若无特别说明，此后所有时间均指标准时间。

5.2.2 飓风轨迹数据连续化处理

将飓风轨迹数据进行连续化处理，即利用三次多项式差值公式，补齐飓风轨迹数据中的时间缺失值已经相应的经纬度数据。考虑可行性，将对飓风的时间及位置的分析限制在这些数据上。

5.2.3 位置数据风场矩阵化

由“桑迪台风模拟风场.csv”可得，风场的存在范围为经度 -84.833333° 至 -64.716667° ，纬度 9.033333° 至 45.641667° ，它被整理为一个 4394×2414 的矩阵，称为风场矩阵，记为W。相应地，可以将船舶以及飓风轨迹的经纬度位置整理为W中的行列位置，仍称为位置。

由于W中两个相邻元素在实际位置上相距约1km，可以在矩阵W中规定一个到实际地理距离的函数 $\| \cdot \|$ ，具体的计算公式为：

$$\|X - Y\| = \sqrt{(X_1 - Y_1)^2 + (X_2 - Y_2)^2}$$

其中， $X = (X_1, X_2)$ ， $Y = (Y_1, Y_2)$ 是W中的位置向量。 $\|X - Y\|$ 可以看做X，Y所对应的实际地理位置之间的地表距离。

5.2.4 初步筛选船舶数据

由数据可知，飓风的影响范围为经度 -84.833333° 至 -64.716667° 纬度 9.033333° 至

45.641667°；影响时间为0到235。因此，对在初始船舶数据中不处于飓风影响范围和时间内的数据及其所在行的数据不予分析。

下面就船舶状态进行数据筛选。主要船舶状态的指数及应含义如表2所示：

图 1 船舶状态说明

指数	含义
0	正常航行中.
1	抛锚中.
2	航次号.
3	船舶机动性能受限.
4	吃水受限.
5	停泊中.
6	搁浅中.
7	渔船捕捞中.
8	航行中.
9	保留值.
10	保留值.
11	动力驱动的船舶正在向后拖动.
12	动力驱动的船舶正在推进或向旁拖动.
13	保留值.
14	搜救应答器处于可使用状态.
15	未定义.

表2第1列对应相应的船舶状态1-15。根据给出的船舶受飓风影响的定义及相关定义，认为状态1、2、3、4、5、6、8、11、12是可能受影响状态；认为状态1、2、3、4、6、8、11、12是异常状态。

理由如下：

- 1) 首先剔除了船舶状态9、10、13、14、15。由于以上状态均为供以后船舶航行状态的修正使用的保留值或未定义，无法判断在该状态下船舶与飓风影响的关系，故将这些状态对应的相关数据作为无用数据。
- 2) 在剩余的船舶状态中，划分状态0、7的船舶为不受影响船舶，状态1、2、3、4、5、6、8、11、12的船舶为可能受影响船舶。由于状态0为正常航行中，对比状态8为航行中，可认为在特定时刻，状态8为船舶受到飓风影响，但仍选择继续航行不绕避，而状态0代表船舶按原状态航行，即完全没有受到飓风影响；状态7为渔船捕捞中，即在飓风特定时刻，船舶正处于安全捕捞的状态，故认定不受飓风影响。因此仅状态1、2、3、4、5、6、8、11、12的船舶为可能受影响船舶，在处于上述状态的船舶进行数据分析。
- 3) 可能受影响的船舶中，划分状态1、2、3、4、6、8、11、12是异常状态。因为 状态5位停泊中，即船舶没有处于正在航行的状态中，所以根据异常状态的定义，状态5不属于异常状态。

六 问题一

在问题一中，考虑到可能受飓风影响的船舶可以分为航行状态和停泊状态，模型一中将分别分析处于航行状态和停泊状态的船舶的运行状况，分别得到在两种情况下实际受影响的船舶数目，然后对其求和得出结果。

6.1 航行状态的船舶

对于处于航行状态的船舶，我们将根据船舶与飓风中心的距离与飓风影响范围作比较，以此判断该船舶是否受到飓风影响，并计算出受影响的船舶数量。

6.1.1 流程图

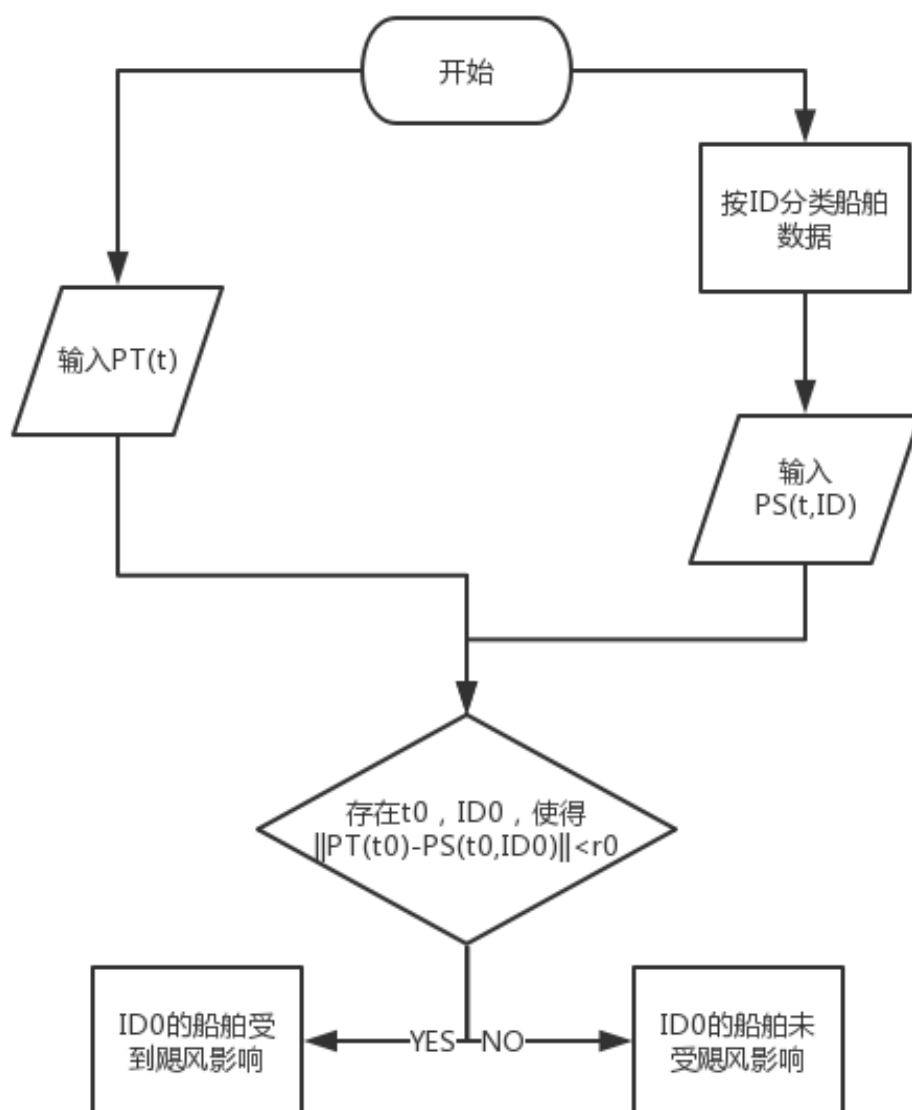


图2 流程图（航行状态）

6.1.2 数据矩阵化

1. 船舶状态矩阵A

船舶航迹数据经过数据预处理后，我们将数据矩阵化成为一个三维的矩阵A，即不同船舶的状态记录矩阵。将同一航次号的船导入A的同一维度，A的同一维度下的第一列为时间，第二列为状态，第三列为航次号，第四五列为经纬度。

2. 飓风位置矩阵R

飓风路径数据经过数据预处理后，我们将数据矩阵化一个二维的矩阵R，即飓风中心点在不同时刻的经纬度。R中，第一列为时间，第二列为经度，第三列为纬度。

9.0000	3.0000	434.0000	-75.5278	39.5547
10.0000	3.0000	434.0000	-75.5279	39.5547
11.0000	3.0000	434.0000	-75.5279	39.5546
12.0000	3.0000	434.0000	-75.5280	39.5546
13.0000	3.0000	434.0000	-75.5282	39.5547
14.0000	3.0000	434.0000	-75.5281	39.5546
15.0000	3.0000	434.0000	-75.5282	39.5547
16.0000	3.0000	434.0000	-75.5282	39.5547
17.0000	3.0000	434.0000	-75.5282	39.5546

图3 部分船舶状态矩阵A

0	-77.4000	14.3000
1	-77.4667	14.2333
2	-77.5333	14.1667
3	-77.6000	14.1000
4	-77.6667	14.0333
5	-77.7333	13.9667
6	-77.8000	13.9000
7	-77.8667	13.8333
8	-77.9333	13.7667

图4 部分飓风位置矩阵R

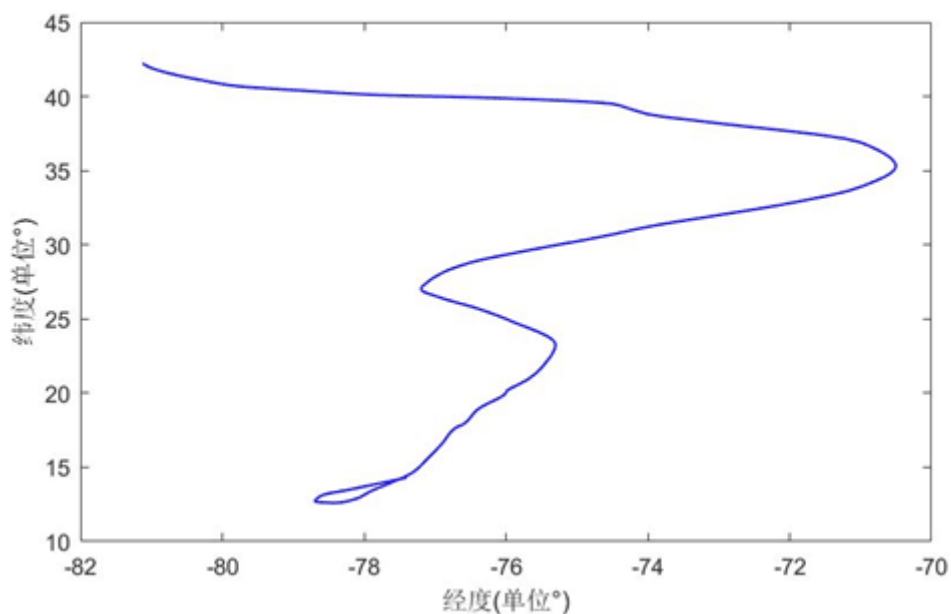


图5 飓风路径

6.1.3 飓风影响范围

1. 做出风力强度图

通过对飓风风场的矩阵化后，我们可以根据飓风风场矩阵 W 作图得到飓风的风力强度图，如图7所示。

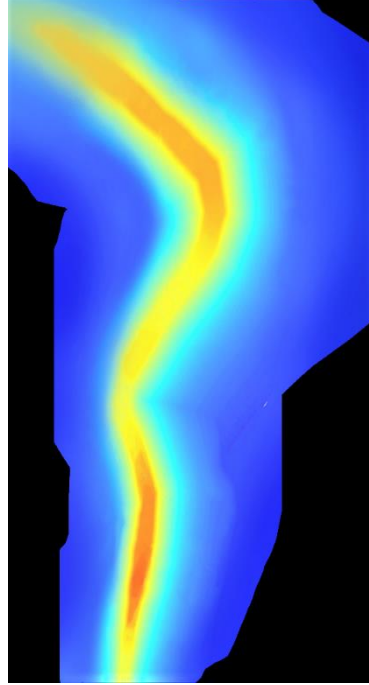


图 6 风力强度图

2. 定义风场影响半径 $R_o(t)$

在图7中，可以假设某一时刻的风场作用区域是一个圆形，强度以飓风中心为圆心，飓风中心四周的风力强度随着圆半径的增大而下降，即风场强度是以圆的方式向四周递减。我们在考虑风场形成的飓风影响时，由于飓风路径不但存在往复情况，而且风场作用强度按照飓风中心的经线对称，所以我们将同一纬线上风场左侧影响边界到路径点的距离，定义为飓风中心的风场影响半径 $R_o(t)$ 。

该风场影响半径 $R_o(t)$ 具体定义为，在同一纬度上，飓风模拟风场数据中飓风中心点的位置到风场强度为0的点的位置。

3. 求出影响半径 $R_o(t)$

我们将每一时刻的飓风中心经纬度带入风场矩阵中，通过下式，求出了飓风中心相对风场矩阵的位置。

$$PTrow(t) = \lceil (45.641667 - PTlat(t)) \div \text{delta} \rceil$$

$$PTcol(t) = \lceil (84.833333 + PTlon(t)) \div \text{delta} \rceil$$

注：

$PTlat, PTlat(t)$: 飓风中心的经度。是一个关于 t 的函数。

$PTlon, PTlon(t)$: 飓风中心的纬度。是一个关于 t 的函数。

$PTrow, PTrow(t)$: 飓风中心相对风场矩阵的行数。是一个关于 t 的函数。

$PTco, PTcol l(t)$: 飓风中心相对风场矩阵的列数。是一个关于 t 的函数。

Delta: 风场经度（纬度）间隔 0.0083333333° ，约1km.

将风场矩阵W进行0-1化处理，即风场存在的矩阵位置元素变更为1，其余为0。然后针对时刻 t_0 的 $PTrow(t_0)$ ，求出风场矩阵W第一列到第 $PTcol(t_0)$ 列的累加和，即得出飓风中心点到飓风影响范围为0的点的距离 $R_0(t_0)$ 。

6.1.4 判断船舶是否受飓风影响

求出飓风中心点的位置 $PT(t)$ 与船舶的位置 $PS(t, ID)$ 的距离，并与风场影响半径 $R_0(t)$ 相比较，判断船舶是否受飓风影响。

对于 ID_0 的船舶，找出时间 t_0 使得下式满足

$$\|PT(t_0) - PS(t_0, ID_0)\| < R_0(t_0)$$

注：

t :	标准化时间.
t_0 :	某一标准化时间.
ID :	航次号.
ID_0 :	某一航次号.
$PT, PT(t)$:	飓风轨迹点的风场矩阵位置。是一个关于 t 的函数.
$PS, PS(t, ID)$:	船舶的风场矩阵位置。是一个关于 t 和 ID 的函数.

若这样的 t_0 存在，则该船舶受到飓风影响，反之则未受到飓风影响。跟根据 ID 值，我们可以求得在航行状态下受飓风影响的船舶数量。

6.2 考虑停泊状态的船舶

给出如下假设：

- 处于停泊状态的船舶，在飓风的影响下只有被摧毁的结果，否则称为是不被飓风影响的。被摧毁的船只不能继续发出信号。

可知，对于停泊状态的船舶，如果同一航次号的船舶数量发生变化，则船舶一定是受到飓风影响。所以在本文中，由于相同航次号的船舶数量是随时间变化的，我们通过计算相同航次号最多的船舶数量，然后与最后时刻的船舶数量作比较，求得在停泊状态中受影响的船舶数量。

6.2.1 数据矩阵化

从预处理后的数据中筛选出处于停泊的船舶（状态5），我们将数据矩阵化成为一个三维的矩阵 rA ，即停泊的船舶状态记录矩阵。将同一航次号的船导入 rA 的同一维度， rA 的同一维度下的第一列为时间，第二列为状态，第三列为航次号，第四五列为经纬度。

130	3	2664	-76.4339	39.1775
132	3	2664	-76.4339	39.1775
133	3	2664	-76.4343	39.1776
134	3	2664	-76.4348	39.1778
135	3	2664	-76.4350	39.1778
136	3	2664	-76.4350	39.1779
137	3	2664	-76.4349	39.1778
138	3	2664	-76.4349	39.1778
139	3	2664	-76.4349	39.1778
140	3	2664	-76.4350	39.1778

图 7 部分船舶状态记录矩阵

6.2.2 受损船舶数量

考虑到不同的船舶可能会采用同一的情况，给出假设：

处于停泊状态的船舶，在飓风的影响下只有被摧毁的结果，否则称为是不被飓风影响的。被摧毁的船只不能继续发出信号。

- 在 rA 中，对于 ID ，统计每一标准时刻的船舶的数量，并对其进行排序，得到船舶数量最大的时刻和该时刻的船舶数量。
- 对于所有 ID 都统计出该 ID 的最大船舶数量，记为 $MAXN(ID)$ 。然后对于所有 ID ，统计出最后时刻船舶的数量，记为 $LASTN(ID)$ 。最后，通过下式，得到在停泊状态下，受飓风影响的船舶数量 σ 。

$$N(ID) = MAXN(ID) - LASTN(ID)$$

$$\sigma = \sum N(ID) (ID \in M)$$

注：

- $MAXN(ID)$: 飓风中心的经度关于 ID 的函数，为相应 ID 的最大船舶数量。
 $LASTN(ID)$: 关于 ID 的函数，为相应 ID 的最后时刻的船舶数量。
 $N(ID)$: 关于 ID 的函数，为相应 ID 被损毁的船舶数量。
 σ : 停泊状态受飓风影响的船舶数量。
 M : 所有停泊状态中的船舶集合。

排除掉船舶信号发出及接收失败的误差，该模型可以求出处于停泊状态的船舶受到飓风影响的数量，自然就囊括了不同船舶共用同一 ID 的情况。

6.3 模型求解

将预处理相关数据代入如上模型，通过MATLAB编程(程序见附录)得到如下结果：

处于航行状态中受到飓风影响的船舶数量为61。

处于停泊状态中受到飓风影响的船舶数量为2300。

将处于航行状态和停泊状态的船舶受到飓风影响的数量求和，即可得到受到飓风影响的总数量。

则，受到飓风影响的船舶数量为2361。

七 问题二

问题二要求对所有船舶在飓风中的绕避方式进行分类。将分析对象限制在需要对飓风进行绕避行为的船舶上，将船舶采取的绕避方式分为三类：继续航行但绕开飓风、暂停航行、继续航行且不绕避飓风；说明命名以上分类方式的依据；给出对船舶的绕避行为进行分类的具体判断方法；得出各船舶绕避方式的判断结果。

7.1 模型建立

7.1.1 船舶绕避方式的分类

在实际受桑迪飓风影响的船舶中，采取的绕避方式共分三类。

- 第一类为继续航行但绕开飓风。采取此种绕避方式的船舶为总体状态处于状态11与12的船舶。
- 第二类为暂停航行。采取此种绕避方式的船舶为总体状态处于状态1的船舶。
- 第三类为继续航行且不绕避飓风。采取此种绕避方式的船舶为总体状态处于状态8的船舶。

7.1.2 分类依据

对于分类一（继续航行但绕开飓风状态）：由于状态11定义为动力驱动的船舶正在向后拖动且限局部区域使用，状态12定义为动力驱动的船舶正在推进或向旁拖动且限局部区域使用，可得处于状态11、12下的船舶仍处于航行状态，但改变了原始航线。故认定总体状态处于状态11与12的船舶采取了继续航行但绕开飓风的绕避方式；

对于分类二（暂停航行）：由于状态1定义为抛锚中，即处于此状态的船舶从正常航行的状态改变到抛锚停止前进，故认定总体状态处于状态1的船舶采取了暂停航行的绕避方式；

对于分类三（继续航行且不绕避飓风）：如前文已说明的，对比状态0为正常航行中，即船舶完全没有受到飓风影响，按原航线正常航行，状态8定义为航行中，表明船舶受到飓风影响，但仍选择继续航行不绕。故认定总体状态处于状态8的船舶受到飓风影响，但仍选择继续航行且不绕避的绕避方式。

另鉴于状态2、3、4、6的船舶可被以上述情况包容，在此不作单独分类。

7.1.3 判断方法

在实际受桑迪飓风影响的船舶中，采取的绕避方式共分三类。

对于如何判断船舶处于何种分类，采取何种绕避方式，首先将处于异常状态的船舶按照 ID 分类，进行船舶是否在飓风危险区的判断，得到船舶危险区判断矩阵 $B(ID)$ ， B 是一个关于 ID 示性函数。若 $B(ID_0)=0$ ，说明 ID_0 的船舶在飓风的危险区内；若 $B(ID_0)=1$ ，则该船舶在飓风危险区外。

对船舶的绕避行为进行分类的判断方法如下：

对于 ID_0 的船舶，通过比较在从异常状态开始到结束的时间段内，状态11、12、1、8在船舶所有状态中的占比情况，得出船舶在异常状态时段内的总体状态，从而判定船舶采取的绕避方式。

存在以下6种情况：

- 若状态11或12占比最大，则船舶采取的绕避方式是继续航行但绕开飓风。
- 若状态1占比最大，则船舶采取的绕避方式是暂停航行。
- 若状态8占比最大，则船舶采取的方式是不绕避。
- 若状态11、12、1占比相同且最大，则比较 $B(ID_0)$ ；若 $B(ID_0)=0$ ，则船舶采取的绕避方式是绕开飓风，若 $B(ID_0)=1$ 则船舶采取的绕避方式是暂停航行。
- 若状态11、12、8占比相同且最大，则比较 $B(ID_0)$ ；若 $B(ID_0)=0$ 则船舶采取的绕避方式是绕开飓风，若 $B(ID_0)=1$ 则船舶采取的绕避方式是不绕避。
- 若状态1、8占比相同且最大，则比较 $B(ID_0)$ ；若 $B(ID_0)=0$ 则船舶采取的绕避方式是暂停航行，若 $B(ID_0)=1$ 则船舶采取的绕避方式是不绕避。

表格 2 $B(ID)$ 部分

ID	14456	434	12555	2563	15
B(ID)	0	1	1	0	0

7.2 模型求解

模型二用MATLAB求解(程序见附录)，求得分类结果如下：

表格 3 绕避方式分类结果

序号	ID	绕避方式			
1	434	1	31	377	1
2	12555	2	32	20807	2
3	5524	1	33	19054	2
4	12555	2	34	15455	2
5	434	1	35	21437	2
6	2664	1	36	20807	2
7	377	1	37	326	1
8	5524	1	38	16443	2
9	149	1	39	747	1
10	176	1	40	149	1
11	2664	1	41	20807	2
12	5524	3	42	377	1
13	326	3	43	5524	1
14	16443	2	44	21443	2
15	18102	2	45	21437	2
16	326	1	46	51	1
17	262	3	47	434	1
18	377	1	48	19054	2
			49	262	3

19	51	1	50	377	1
20	2664	1	51	972	3
21	377	1	52	21437	2
22	5524	1	53	21437	2
23	15455	2	54	972	3
24	16443	2	55	747	1
25	2664	1	56	747	1
26	19054	2	57	747	1
27	176	1	58	51	1
28	262	3	59	747	1
29	149	1	60	747	1
30	2664	1	61	51	1

表2中第一列数据代表船舶序号，第二类数据代表船舶ID，第三列数据中的1、2、3分别对应船舶采取了第一类、第二类、第三类绕避方式。

结果表明共有35艘船舶，采取了第一类绕避方式（继续航行但绕开飓风）；19艘船舶采取了第二类绕避方式（暂停航行）；共7艘船舶，采取了第三类绕避方式（继续航行且不绕避飓风）。

八 问题三

我们需要设计各类船舶绕避方式的绕避成本的计算方式并且计算出相应的结果。根据以下定义：

定义 5 额外航行距离：船舶从绕避过程开始到绕避过程结束所航行的地表距离。

定义 6 绕避时间：船舶从绕避过程开始到绕避过程结束所消耗的时间。

我们可以统一各类船舶绕避方式的成本的计算方法。

8.1 模型的建立

对于ID0的一艘船，其绕避时间 T_{rb} 的计算方式如式？

$$T_{rb} = t_{rb,fin} - t_{rb,fir}$$

注：

t_{rb} : 船舶绕避过程中的时间.

$t_{rb,fir}$: 该船绕避行为开始时刻.

$t_{rb,fin}$: 该船绕避行为结束时刻.

其绕避距离 S_{rb} 的计算方式如下式：

$$S_{rb} = \sum_i \|PS(t_{rb,i+1}) - PS(t_{rb,i})\|$$

8.2 模型求解与分析

模型三用MATLAB求解（程序见附录），求得结果如下表：

序号	ID		绕避方	27	176	72	2.560009	1
----	----	--	-----	----	-----	----	----------	---

		T_{nb}	S_{nb}	式					
1	434	226	105.4145	1	29	149	67	410.0828	1
3	5524	212	550.3781	1	30	2664	66	63.86755	1
5	434	190	101.3338	1	31	377	64	42.78963	1
6	2664	187	205.6149	1	37	326	54	19.52917	1
7	377	182	3264.621	1	39	747	49	5.188161	1
8	5524	180	398.0599	1	40	149	48	173.6926	1
9	149	179	2386.206	1	42	377	47	41.79735	1
10	176	164	4191.82	1	43	5524	46	43.3201	1
11	2664	156	203.1231	1	46	51	43	503.0313	1
12	5524	150	327.0963	3	47	434	41	43.64969	1
13	326	147	51.04087	3	50	377	38	41.54179	1
16	326	126	42.00363	1	55	747	26	0.700599	1
18	377	114	1498.842	1	56	747	25	0.68982	1
19	51	106	1407.167	1	57	747	23	0.661158	1
20	2664	105	164.389	1	58	51	17	206.5476	1
21	377	104	1045.096	1	59	747	14	0.309724	1
22	5524	97	217.8455	1	60	747	13	0.289318	1
25	2664	86	127.1065	1	61	51	10	0.522739	1

由表3可知：大部分船舶采用方式1，即绕开飓风继续航行，进行对飓风的绕避行为；ID为5524序号为12的一艘船和ID为326的其中一艘船采用方式3，即不绕避继续航行。绕避时间从10h到226h，绕避距离从0.289km到3264.621不等，各数据之间看似差距很大。

结合表2可知，在进行绕避行为的61艘船中，仅有37艘船的绕避行为成功，而采取方式2，即抛锚的船舶全部没有成功绕避，采用方式3的仅有2艘船成功。

实际上，这样的数据是合理的。原因如下：

1. 由于船舶的绕避行为是复杂的，在1个标准时间内可能会多次变更措施，而模型只能通过时刻的船舶状态来整体评价船舶的绕避行为，这样就会导致时间与距离的关系并不是很明显。
2. 飓风会严重影响船舶的航海性能，导致在判断船舶的绕避行为中干扰信息太多，使得得出的信息与实际有出入。

忽略上述误差，作出船舶的在整个绕避过程中的速率表，如表4：

表格 5 绕避过程中的速率表

序号	ID	绕避方式	速度 (km/h)				
1	434	1	0.4664356	27	176	1	0.0356
3	5524	1	2.5961229	29	149	1	6.1206
5	434	1	0.5333356	30	2664	1	0.9677
6	2664	1	1.0995451	31	377	1	0.6686
7	377	1	17.937475	37	326	1	0.3617
8	5524	1	2.2114439	39	747	1	0.1059
9	149	1	13.330759	40	149	1	3.6186
10	176	1	25.559876	42	377	1	0.8893
11	2664	1	1.3020713	43	5524	1	0.9417
12	5524	3	2.1806422	46	51	1	11.698
13	326	3	0.3472168	47	434	1	1.0646
				50	377	1	1.0932

16	326	1	0.3333621	55	747	1	0.0269
18	377	1	13.147741	56	747	1	0.0276
19	51	1	13.27516	57	747	1	0.0287
20	2664	1	1.5656095	58	51	1	12.15
21	377	1	10.048998	59	747	1	0.0221
22	5524	1	2.2458294	60	747	1	0.0223
25	2664	1	1.4779821	61	51	1	0.0523

由表4分析，ID149序号7的船舶，ID176序号10的船舶距飓风较远，因而受到影响较小；ID149，序号9，ID377序号18，ID51序号19，ID377序号21，ID149序号29，ID51序号46，ID51序号58的船舶距离飓风相对较小，受到飓风的影响较大；而其他船舶距离飓风太近，受到严重影响。

表格 6 船舶距飓风的距离

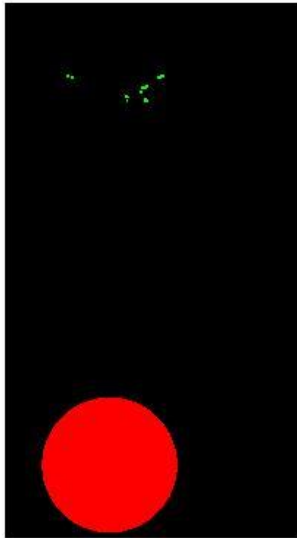
序号	ID	飓风距离	27	176	1283.597
1	434	237.2142	29	149	207.3488
3	5524	178.7791	30	2664	693.6907
5	434	237.2142	31	377	1254.535
6	2664	693.6907	37	326	178.8078
7	377	1254.535	39	747	353.8911
8	5524	178.7791	40	149	207.3488
9	149	207.3488	42	377	1254.535
10	176	1283.597	43	5524	178.7791
11	2664	693.6907	46	51	354.2136
12	5524	178.7791	47	434	237.2142
13	326	178.8078	50	377	1254.535
16	326	178.8078	55	747	353.8911
18	377	1254.535	56	747	353.8911
19	51	354.2136	57	747	353.8911
20	2664	693.6907	58	51	354.2136
21	377	1254.535	59	747	353.8911
22	5524	178.7791	60	747	353.8911
25	2664	693.6907	61	51	384.6087

结合船舶距飓风的距离数据可知：在距离飓风较远的5艘船中，有2艘船的速度与模型结果接近。这说明了模型对绕避时间 T_{rb} 和绕避距离 S_{rb} 的计算有一定的准确部分，但仍有一定的误差部分。

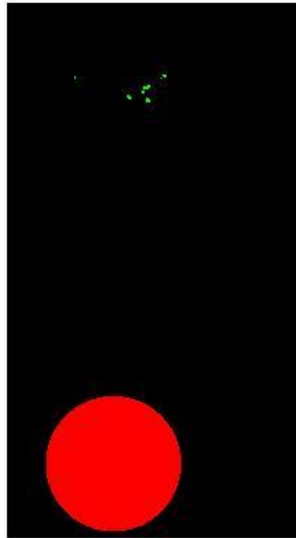
九 模型检验

已知在风场矩阵W中的飓风轨迹点位置 PT 以及船舶的位置 PS 。且 PT 和 PS 均是关于时间 t 的函数，因此可以利用元胞自动机来检验模型求解过程。编写相应程序并实现的部分结果如下：

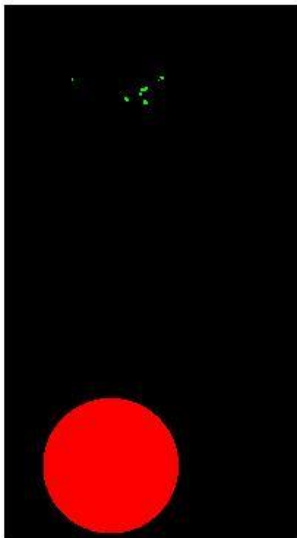
T=5



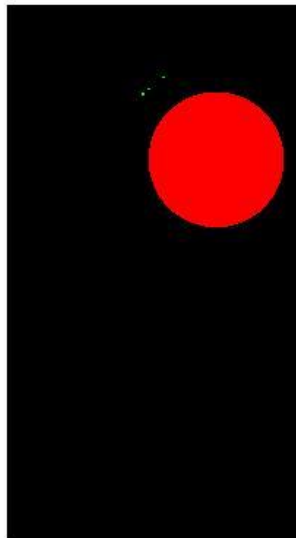
T=50



T=50



T=180



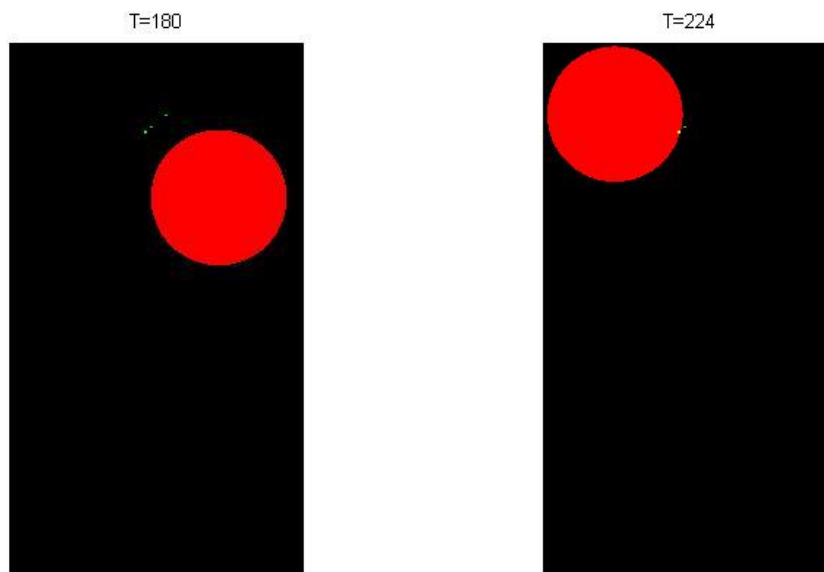


图 8 检验结果

其中， T 表示标准化时间 t ，绿色的点表示航行中的受到飓风影响的船舶位置，红色区域表示飓风的安全区域。根据展示的结果可知：建立起来的模型具有良好的实用性。

从图上可以观察到长时间存在于安全区域内部的船舶，这是不合实际的。但是这种情况是由数据本身带来的，与模型无关。因此我们还是可以肯定模型的正确性与实用性。

十 模型评价

10.1 模型优点

1. 本文利用大数据筛选、聚类分析等方式进行数据简化，应用MATLAB实现数学模型的求解。数据可视化强，模型的求解时间短，且求解结果真实可信。
2. 本文用元胞自动机检验模型，模拟了船舶在遭遇飓风时的绕避行为，证实了我们对问题二绕避行为分类的正确性。

10.2 模型缺点

1. 由于船舶的绕避行为是复杂的，在1个标准时间内可能会多次变更措施，而模型只能通过时刻的船舶状态来整体评价船舶的绕避行为，这样就会导致时间与距离的关系并不是很明显。
2. 飓风会严重影响船舶的航海性能，导致在判断船舶的绕避行为中干扰信息太多，使得得出的信息与实际有出入。

参考文献

- [1] 宋斌, 关于在西北太平洋避抗台风的见解
- [2] 张宏军, 物理系统的元胞自动机模拟
- [3] <http://www.huoche.net/show_506096/>
- [4] <<http://www.cctime.com/html/2018-4-26/1283101.htm>>
- [5] 邓冠铁, 复变函数论

附 录

%%%%%%%%各问题模型%%%%%%%%
%%%%%%%%

```
load('X.mat');
load('A0.mat');
i=1;A=[];
r=556;%受影响距离限定值
while i>0
    j=X(1,3);
    X0=X(X(:,3)==j,:);%X0记录同一ID船的数据
    n=size(X0,1);
    A(1:n,:,i)=X0;
    i=i+1;
    if n+1<=size(X,1)
        X=X(n+1:end,:);
    else i=0;
    end;
end;
```

%%%%%%%%%%%%%求出风场影响半径%%%%%%%%55

```
function r=rad(x1,x2)
load('field.mat');
delta=0.0083333333;fie=double(field);
a2=ceil((45.641667-x2)/delta);
a1=ceil((x1+84.833333)/delta);
b=fie(a2,1:a1);r=sum(b);
end
```

%%%%%%%%生成航行中船舶的受影响判断矩阵B%%%%%%%%
%%%%%%%%生成航行中受影响的船舶状态矩阵A%%%%%%%%

```
load('X.mat');%读船舶，飓风以及风场的数据；
load('A0.mat');%飓风路径
```

```

load('A.mat');
nn=size(A,3);
B=zeros(3,nn);
B(1,:)=1:nn;
B(2,:)=A(1,3,:);
AA=[];
for ii=1:1:nn
    kk=sum(A(:,1,ii)>0);
    for jj=1:1:size(A0,1)
        location=find(A(1:kk,1,ii)==A0(jj,1));
        if isempty(location)~=1

R1=sum(A(location(1):location(end),4,ii))/size(A(location(1):location(end),4,ii),1);

R2=sum(A(location(1):location(end),5,ii))/size(A(location(1):location(end),5,ii),1);
        R=6371*sqrt((A0(jj,2)-R1)^2+(A0(jj,3)-R2)^2)/(2*pi);

        r=556;
        if R<=rad(R1,R2)
            B(3,ii)=1;
        end
        if R<=r
            B(4,ii)=1;
            break;
        end
    end
end
end
BB=sum(B(3,:)>0)
AA=[];
locB=find(B(3,:));
for i=1:BB
    AA(:,i)=A(:,i,locB(i));
end
AA;B;

```

%%%%%%%%船舶绕避方式判断矩阵C%%%%%%%%

```

load('AA.mat');%AA为受影响船只的状态记录矩阵
load('B.mat');
nn=size(AA,3);
C=[];
A1=AA;
for j=1:1:nn
    a=sum(sum(A1(:,2,j)==11,1))+sum(sum(A1(:,2,j)==12,1));
    b=sum(sum(A1(:,2,j)==1,1));
    c=sum(sum(A1(:,2,j)==8,1));
    C(1,j)=AA(1,3,j);
    if a>b
        C(2,j)=1;d=a;
    else if a<b
        C(2,j)=2;d=b;
    else if B(4,j)==1
        C(2,j)=2;d=b;
    else C(2,j)=1;d=a;
    end;
end;
end;
if d<c
    C(2,j)=3;
else if d>c
    C(2,j)=C(2,j);
    else if B(4,j)==1
        C(2,j)=3;
    end;
end;
end;
end;

%%%%%%%%%%%%船舶绕避成本
D%%%%%%%%
load('AA.mat');
load('C.mat');
D=[];
nn=size(AA,3);

```

```

A2=[];
for i=1:nn
    m=C(2,nn);
    if m==1
        AA1= AA(AA(:,2,i)~=1,(:,i);AA2=AA1(AA1(:,2)~=8,:);
        nnn=size(AA2,1);
        A2(1:nnn,(:,i)=AA2;
    end;
    if m==2
        AA1=
AA(AA(:,2,i)~=11,(:,i);AA2=AA1(AA1(:,2)~=12,:);AA3=AA2(AA2(:,2)~=8,:);
        nnn=size(AA3,1);
        A2(1:nnn,(:,i)=AA3;
    end;
    if m==3
        AA1=
AA(AA(:,2,i)~=11,(:,i);AA2=AA1(AA1(:,2)~=12,:);AA3=AA2(AA2(:,2)~=1,,:);
        nnn=size(AA3,1)
        A2(1:nnn,(:,i)=AA3;
    end;
end;
A22=[];
for ii=1:nn
    if A2(:, :,ii)==0
        A22=[A22 ii];
    end;
end
A2(:, :,A22)=[];
nnum=[1:nn];nnum(A22)=[];
nn1=size(A2,3);
for j=1:nn1
    D(1,j)=A2(1,3,j);num=sum(A2(:,3,j)>0);
    D(2,j)=A2(num,1,j)-A2(1,1,j)+1;
    D(3,j)=0;
    if num>1
        for jj=1:num-1
            dista=(6371/(2*pi))*sqrt((A2(jj+1,4,j)-A2(jj,4,j))^2+(A2(jj+1,5,j)-A2(jj,5,j))^2);

```

```

        D(3,j)=D(3,j)+dista;
    end
end
end;
D=[nnum;D];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%按照ID生成停泊中可能受到影响的船舶状态
矩阵Ar%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load('mship.mat');
i=1;Ar=[];
mship=sortrows(mship,3);
while i>0
    j=mship(1,3);X0=mship(mship(:,3)==j,:);%X0记录同一ID船的数据
    n=size(X0,1);Ar(1:n,:,i)=X0;i=i+1;
    if n+1<=size(mship,1)
        mship=mship(n+1:end,:);
    else i=0;
    end;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%计算停泊中受到影响的船舶数量
sigma%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load('Ar.mat');
n=size(Ar,3);
sigma=0;
for i=1:n
    Ar(:, :, i)=sortrows(Ar(:, :, i),1);
    nn=sum(Ar(:,3,i)>0);
    d=mode(Ar(1:nn,1,i));
    e=Ar(nn,1,i);
    num1=sum(Ar(1:nn,1,i)==d);
    num2=sum(Ar(1:nn,1,i)==e);
    sigma=sigma+num1-num2;
end
sigma;

```


%%%%%%%%%%元胞自动机检验程

序%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%风场矩阵化函
数%%%%%%%%%

function r=radd(x1,x2)

delta=0.0083333333;

a2=ceil((45.641667-x2)/delta);%飓风轨迹相对风场矩阵的行数

a1=ceil((x1+84.833333)/delta);%飓风轨迹相对风场矩阵的列数

r=[a1 a2];

end

%%%%%%%%%%飓风路径风场矩阵
化%%%%%%%%%

load('A0.mat');nn=size(A0,1);

AA0=[];r2=556;

for i=1:nn

 a2=ceil((45.641667-A0(i,3))/delta);

 a1=ceil((A0(i,2)+84.833333)/delta);

 AA0=[AA0;a2 a1];

end;

AA0;

%%%%%%%%%%船舶位置风场矩阵
化%%%%%%%%%

load('A.mat');

nn=size(A,3);

AA为风场以及安全距离内区域

AA=zeros(size(A,1),3,nn);

r2=556;

for i=1:nn

 XX=[];k=sum(A(:,1,i)>0);delta=0.0083333333;

 for j=1:k

 a2=ceil((45.641667-A(j,5,i))/delta);

```

a1=ceil((A(j,4,i)+84.833333)/delta);
XX=[XX;j a2 a1];
end
AA(1:k,:,i)=XX;
end;
AA;

%%%%%%%%%%%%%%元胞自动机作图函数
1%%%%%%%%%%%%%%

function [B,flag]=posi(t)
load('AA0.mat');
load('AA.mat');
load('posit.mat');
nn=size(AA,3);
C=zeros(4394,2414,2);tt=1;
if t>235
    tt=0;
else
    r0=(posit(:,1)-AA0(t,1)).^2+(posit(:,2)-AA0(t,2)).^2;
    r0=(r0<=555.6*555.6);r0(AA0(t,1),AA0(t,2))=0;C(:,1)=r0;
    C(AA0(t,1),AA0(t,2),2)=1;
    for i=1:nn
        ii=sum(AA(:,1,i)>0);
        if t<=ii
            b=min(abs(AA(:,1,i)-t));bb=AA(abs(AA(:,1,i)-t)==b,:,i);
            boatc=sum(bb(:,2))/size(bb,1);
            boatl=sum(bb(:,3))/size(bb,1);
            C(boatc,boatl,2)=1;
            rr1=max(boatc-10,0);rr2=min(boatc+10,4394);
            rr3=max(boatl-10,0);rr4=min(boatl+10,2414);
            C([rr1:rr2],[rr3:rr4],2)=1;
        end;
    end;
end;
B=C;flag=tt;
end

```

%%%%%%%%%%元胞自动机作图函数
2%%%%%%%%%

```
close all;clc;clear;

load('AA0.mat');
load('AA.mat');
load('posit.mat');
figure;
axes;rand('state',0);
set(gcf,'DoubleBuffer','on');
[S,sommm]=posi(1);
Sk=zeros(4394,2414);
Sk=S;
C=zeros(4394,2414,3);
R=zeros(4394,2414);
G=zeros(4394,2414);
R(Sk(:,:,1)==1)=1;G(Sk(:,:,2)==1)=1;
C(:,:,1)=R;
C(:,:,2)=G;
Ci=imshow(C);ti=0;
tp=title(['T=',num2str(ti)]);
flag=1;
while flag;
    ti=ti+1;
    [Sk,flag]=posi(ti);
    R=zeros(4394,2414);
    G=zeros(4394,2414);
    R(Sk(:,:,1)==1)=1;
    G(Sk(:,:,2)==1)=1;
    C(:,:,1)=R;
    C(:,:,2)=G;
    set(Ci,'CData',C);
    set(tp,'string',['T=',num2str(ti)]);
    pause(5);
end
```