

【武器装备】

巡航导弹航迹与威胁区相对位置判定方法

杨得国,王明海,王立安

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

摘要:分析了巡航导弹航迹规划时所考虑的主要威胁来源,介绍了2种判定航迹与威胁区位置关系的方法,即基于地图栅格化的判定方法和基于矢量图的判定方法,对2种方法的判定步骤进行了细致的描述。建立问题的模型,分别对2种方法进行了仿真,比较了其判定时间和判定准确性,得到了2种判定方法的优劣,给出了在不同条件下的优选方法。

关键词:巡航导弹;航迹规划;相对位置;威胁规避

中图分类号:TJ761.6

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2011)08-0010-04

A study of Estimation on Relative Position between Path and Threat for Cruise Missile

YANG De-guo, WANG Ming-hai, WANG Li-an

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The main threat which is thought in path planning for cruise missile is analyzed. Two estimations on relative position between path and threat which are based on grid map and vector map are introduced. The estimation steps are described amply. The emulation example is given to compare time and veracity. The better method in different condition is given based on advantage and disadvantage of the two methods.

Key words: cruise missile; path planning; relative position; threat avoidance

巡航导弹的航迹规划就是要利用地形和敌情等信息,以实现地形跟随、地形回避和威胁回避的飞行目的,规划出生存概率最大的突防轨迹^[1]。航迹规划的过程中,需要判定航迹与威胁区的相对位置关系,即判定所规划的航迹是否通过威胁区。威胁区由敌方雷达探测区域、敌防空火力网防御范围、气象限制不可飞行区域、政治限制禁飞区、地形限制不可飞行区域等组成,是对巡航导弹航迹产生具体威胁的源头^[2]。对航迹是否通过威胁区的判定方法有很多,本文旨在通过对几种方法的分析、仿真,比较其判定时间长短及判定的准确率,得出在不同条件下的优选方法。

1 威胁环境建模

巡航导弹的航迹规划涉及的问题很多,需要解决的首要问题是威胁环境模型的建立。合理的威胁环境模型既可以减少规划空间的信息存储量,又可以减少规划中的搜索量。

战场环境除了涉及发射点、目标点信息外,还包括威胁区和禁飞区。巡航导弹的飞行航迹与环境密切相关,如果环境不能反映实际威胁分布情况,则规划出来的飞行航迹是没有意义的。因此,合理地进行威胁区建模是航迹规划的关键。

本文在进行航迹规划时,对威胁区做如下假设:

1) 已知威胁区的分布情况,主要包括地形威胁、雷达探测威胁及敌防空火力网威胁。

2) 巡航导弹做等高度飞行,将三维航迹规划问题简化成二维问题来处理,对威胁仅做回避飞行。

在上述假设的基础上,对威胁区进行数学建模。巡航导弹在其巡航阶段基本保持在一定的高度进入水平飞行,相应地,在对威胁区进行数学建模时,可根据相应的突防高度得到某一平面威胁分布图,即基于飞行器巡航高度的水平截面的威胁分布图。威胁场中主要考虑地形信息和敌情信息。

1.1 地形建模

地形数据由数字地图高程数据表提供,数字地图高程数

收稿日期:2011-05-31

作者简介:杨得国(1986—),男,硕士研究生,主要从事飞行器设计研究;

王明海(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事导弹精确制导与突防技术研究。

据表(DTED)以栅格(Grid)形式存储了地形高度值。对地形威胁的模型建立方式主要由2种。

第1种:基于数字地图的栅格化处理方式,在网格存储的信息中,包括该网格是否对导弹的飞行构成威胁等信息。

第2种:对巡航导弹航迹规划区内的地形威胁进行相应的预处理,采用威胁圆的方式进行建模。根据实际情况选用一系列适当半径的圆将威胁区包含在内,既可以有效地记录威胁区的位置、大小等状况,又可以减小信息的存储量。若遇到连绵山峰的情况,可以使用几个边缘重叠的圆来表示。相邻的禁飞区以最贴近的圆包络,并记录下该圆的圆心及半径,不规则地形表示为若干个圆的叠加。

1.2 威胁建模

巡航导弹主要受到来自敌方的预警雷达、低空导弹、高射炮的威胁。雷达视为以雷达所处位置为球心,扫描半径为威胁半径的半球体;高射炮火力威胁视为从发射点到射程高度的圆柱体;低空导弹有相应的攻击区域,表示为由近边界到远边界的球体。在巡航高度所处的平面内,上述威胁均可处理成威胁圆,威胁圆的中心点为各种威胁的中心点,威胁圆的半径为各种威胁的作用距离。

2 基于地图栅格化的判定方法

所谓数字地图栅格化是基于单元分解的规划方法的一种,将数字地图的规划空间划分为大小均匀、紧密相邻的网格阵列,每个网格作为一个像元或像素,由行号作为标识符,对应属性值描述其特征,描述的主要特征包括坐标、威胁值等信息^[3]。用大小相等的矩形栅格划分环境来区分环境中的自由空间和障碍物,可作为表示环境的一种有效方法。

对数字地图进行栅格化处理以后,对航迹与威胁区位置关系的判定方法主要有2种:点位距离判定法、网格威胁判定法。

2.1 点位距离判定法

所谓点位距离判定法,就是计算航迹上所对应的每个网格与威胁区中心点的距离,根据距离与威胁区域半径的关系判定该航迹与威胁区的相对位置关系。若存在距离小于威胁半径的情况,则说明该航迹段上存在过威胁区域的点,这段航迹不可行;若距离均不小于威胁区域半径,则说明该航迹不通过威胁区域,航迹段为可行航迹段。如图1所示。

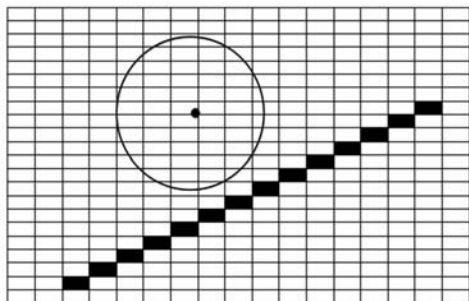


图1 点位距离判定法示意图

图1中,黑色阴影网格表示的是航迹段所经过的网格,圆形区域代表威胁区域,圆的中心点表示威胁区域的中

心点。

2.2 网格威胁判定法

所谓网格威胁判定法,就是在对数字地图进行栅格化处理时,便将威胁信息作为网格的属性将其存储,判定时,逐个读取航迹段所对应的网格的属性信息,来判定该航迹段与威胁区的相对位置关系^[4]。

若某个网格的属性显示该网格的威胁值超过了允许范围,则说明该段航迹上存在过威胁区域的点,这段航迹为不可行航迹段;若该段航迹段上的网格属性均显示威胁值在允许范围内,则说明该段航迹段不通过威胁区域,航迹段为可行航迹段。如图2中所示,黑色阴影网格表示的是航迹段所经过的网格,灰色阴影网格表示超过威胁值允许范围的网格,网格属性为1,空白网格表示威胁值在允许范围内,网格属性为0。

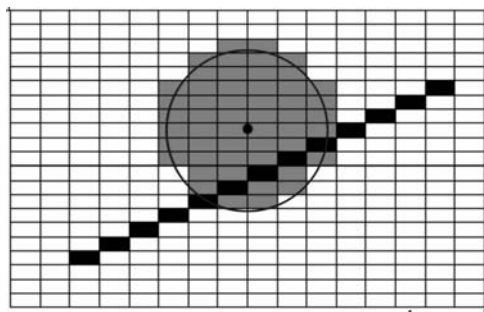


图2 网格威胁判定法示意图

3 基于矢量图的判定方法

基于矢量图的判定方法,是指构建航迹及威胁区域的规则几何模型,通过相应的几何推导,判断航迹段是否过威胁区域,进而得到航迹段与威胁区的相对位置关系。二维规划时,将航迹段看成直线段,因此描述某段航迹段时,只需存储航迹段起点坐标和终点坐标。威胁区域简化为圆形,需要存储威胁区域的中心点坐标及威胁半径。利用下述方法来计算航迹段是否过威胁区,从威胁区出发,判定威胁区与航迹段的位置关系,进而判定航迹段是否过威胁区。具体步骤:

1) 构建问题模型。

已知航迹段起点 Q 坐标 (x_1, y_1) ,终点 Z 坐标 (x_2, y_2) ,威胁区中心点坐标 $W(a, b)$,威胁半径 R 。模型如图3所示。

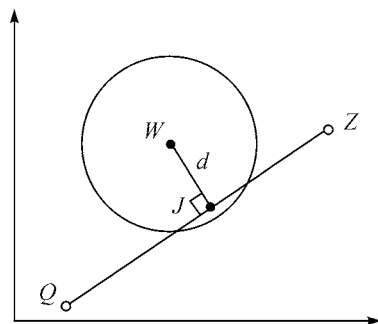


图3 问题模型

2) 判定航迹段起点、终点是否在威胁区内。

根据两点间的距离公式,分别计算航迹段起点、终点与威胁区中心点距离的平方 l_1^2, l_2^2 。

$$l_i^2 = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2, i = 1, 2 \quad (1)$$

根据 l_i^2 与 R^2 的大小关系,判断航迹段的起点、终点是否在威胁区内。若 l_i^2 小于 R^2 ,表示航迹段起点或者终点在威胁区内,则该段航迹段为不可取航迹段;否则,说明航迹段的起点、终点均不在威胁区内,则需进行下一步的判断。

3) 判定航迹段所在的直线是否通过威胁区。

根据航迹段起点坐标 (x_1, y_1) 和终点坐标 (x_2, y_2) ,由直线的两点式方程,得到航迹段所在直线的方程。

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

对式(2)化简,得到该直线的一般式

$$(y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + x_1y_2 - x_2y_1 = 0 \quad (3)$$

根据点到直线的距离公式,计算威胁区中心点 (a, b) 到航迹段所在直线的距离 d 。记录点到直线距离所在直线与航迹段所在直线的交点 J 坐标 (x_3, y_3) 。

$$d = \frac{|Aa + Bb + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4)$$

$$x_3 = \frac{B^2a - ABb - AC}{A^2 + B^2} \quad (5)$$

$$y_3 = -\frac{Ax_3 + C}{B} \quad (6)$$

其中:

$$A = y_1 - y_2, B = x_2 - x_1, C = x_1y_2 - x_2y_1$$

判定距离 d 与半径 R 的大小关系:若 d 等于 R ,则表明该航迹段所在直线与威胁圆相切,不需要做回避;若 d 大于 R ,则表明该航迹段不过此威胁区,不需要做回避;若 d 小于 R ,则存在 2 种情况,航迹段过威胁区,如图 3,航迹段所在的直线过威胁区但航迹段本身不过威胁区,如图 4。

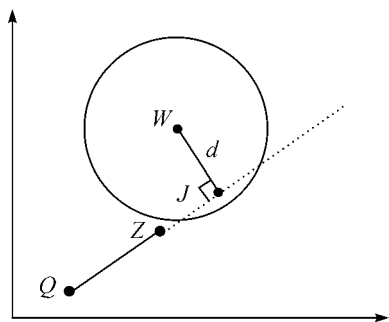


图4 航迹段所在的直线过威胁区但航迹段本身不过威胁区

4) 判定航迹段是否过威胁区。

利用向量夹角^[5]的判定条件,判定向量 \vec{QJ} 与向量 \vec{ZJ} 的夹角。

$$\vec{QJ} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1) \quad (7)$$

$$\vec{ZJ} = (x_3 - x_2, y_3 - y_2) \quad (8)$$

$$\cos \langle \vec{QJ}, \vec{ZJ} \rangle = \frac{\vec{QJ} \cdot \vec{ZJ}}{|\vec{QJ}| \cdot |\vec{ZJ}|} = \frac{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2) + (y_3 - y_1)(y_3 - y_2)}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}} \quad (9)$$

若该余弦值大于 0,则说明 2 向量同方向,即航迹段所在的直线过威胁区但航迹段本身不过威胁区;否则,说明 2 向量反方向,即航迹段过威胁区。

4 模型仿真及数据分析

4.1 模型仿真

在 Matlab 环境下,对基于地图栅格化的判定方法和基于矢量图的判定方法进行仿真,基于地图栅格化的判定方法主要仿真点位距离判定法。假设规划区域大小为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$,规划网格大小为 100 m ,起点坐标为 $(30, 30)$,终点坐标为 $(80, 80)$,单位 km 。威胁区中心点是由规划区域内随机产生的,威胁半径取 20 km 。分别对 2 种判定方法进行 15 次仿真,结果如表 1。

表 1 仿真结果

实验次数	原方法计算时间/s	现方法计算时间/s	时间比 (网/矢)	过威胁否	类型
1	0.001 207	0.000 025	48.28	否	2
2	0.001 007	0.002 966	0.34	是	4
3	0.001 223	0.002 695	0.46	否	3
4	0.001 227	0.000 023	53.35	否	2
5	0.001 255	0.000 027	46.48	否	2
6	0.001 177	0.000 020	58.85	否	2
7	0.001 311	0.000 033	39.73	否	2
8	0.001 746	0.000 125	13.97	是	1
9	0.001 819	0.000 024	75.79	否	2
10	0.002 680	0.000 026	103.08	是	1
11	0.001 146	0.002 455	0.47	否	3
12	0.001 227	0.000 020	61.35	否	2
13	0.000 673	0.000 016	42.06	是	1
14	0.001 645	0.000 015	109.67	是	1
15	0.001 231	0.000 018	63.39	否	2

表 1 中,类型 1,2,3,4 分别指代如图 5 所示的图形:类型 1 指起点或终点在威胁区内,类型 2 指航迹段所在的直线通过威胁区,类型 3 指航迹段所在的直线通过威胁区,但航迹段不过威胁区,类型 4 指航迹段过威胁区。如图 5~8 所示。

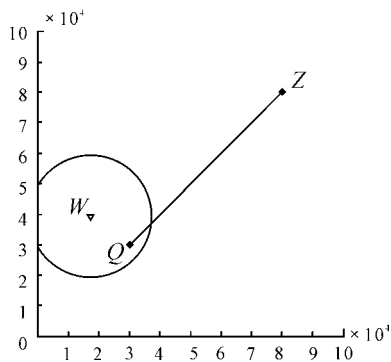


图5 类型1

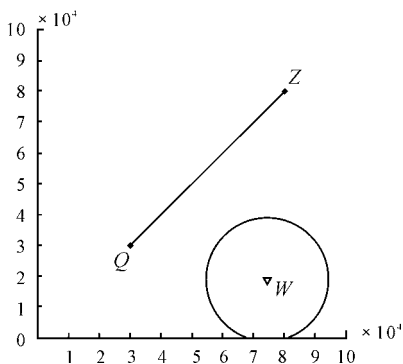


图6 类型2

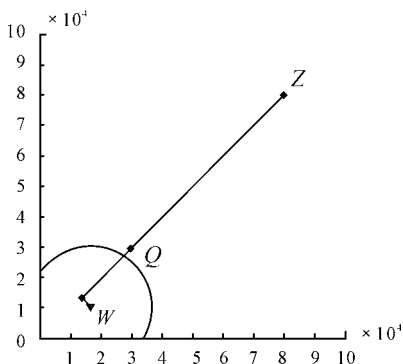


图7 类型3

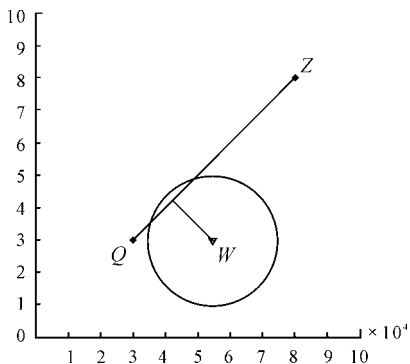


图8 类型4

4.2 数据分析

通过对表1的分析,可以看出,与基于地图栅格化的判定方法相比,基于矢量图的判定方法有以下优点。

1) 计算时间大大缩短。从表1可以看出,现在的计算时间与原计算方法相比,大大减少,是原计算时间的几分之一。但也有几次计算时间比原方法时间要长,约为原时间的2到3倍。总体看来,这种方法比原方法节省了很多时间。

2) 能够准确判断航迹段与威胁区的位置关系。通过对该方法的仿真实验,可以看到,这种方法能够准确判断航迹段与威胁区的位置关系,准确描述出航迹段是否过威胁区,起点、终点是否在航迹段里面,航迹段与威胁区交点信息等,为计算如何回避提供大量的信息支撑。

3) 存储的数据量大大减小。基于地图栅格化的判定方法需要存储大量的点位信息,如本例中,按照以往的方法,为了完整表达该航迹段上的信息,需要存储 $(80\ 000 - 30\ 000)/100 = 500$ 个点位的信息,现在只需要存储起点、终点、威胁区中心点等几个点的点位信息,与以往相比,存储的数据量大大减少。

但也存在几点不足:

1) 需要对数字地图进行大量的预处理,使其能够利用基于矢量图的判定方法进行计算。

2) 对地形威胁进行预处理时,可能将某些威胁边缘区域但不属于威胁区的点,当作威胁来处理,使误差增大。

5 结束语

对判定巡航导弹航迹与威胁区相对位置关系的几种方法进行了分析、仿真,比较了基于地图栅格化的判定方法和基于矢量图的判定方法的判定时间长短。可以看出,在对数字地图进行了预处理之后,采用基于矢量图的判定方法更能节省计算时间和存储空间。

参考文献:

- [1] 闵昌万,袁建平. 军用飞行器航迹规划综述[J]. 飞行力学,1998,16(4):14-19.
- [2] 张红,卢广山,朱荣刚. 无人作战飞机任务系统技术研究[J]. 电光与控制,2006,13(1):55-59.
- [3] 谢晓方,孙涛,欧阳中辉. 反舰导弹航路规划技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010:85-86.
- [4] 单敏瑜. 无人机航路规划算法研究与应用[D]. 无锡:江南大学,2009.
- [5] 同济大学应用数学系. 高等数学[M]. 高等教育出版社,2001:301-309.

(责任编辑 陈松)