

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.11.002

# 多方向饱和攻击时反舰导弹航路规划方法

张书宇<sup>1</sup>, 张金春<sup>1</sup>, 李雪梅<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001; 2. 中国航天科工集团第三研究院, 北京 100074)

**摘要:** 针对难于求得多方向饱和攻击时反舰导弹航路规划全局最优解的问题, 对多方向饱和攻击时各枚反舰导弹的航路进行合理设定。依据反舰航路规划的基本约束条件, 建立以自控飞行距离最短为目标的航路规划模型, 在此基础上, 结合平面几何相关知识, 将多枚反舰导弹多方向攻击时的航路规划问题转化为求解各枚反舰导弹关键导航点的问题, 给出一种快速构造各枚反舰导弹航路的求解方法, 并进行仿真验证。仿真结果表明: 该方法能快速构造多枚反舰全方位饱和攻击时的简单航路, 符合多方向攻击要求, 易于工程实现。

**关键词:** 航路规划; 饱和攻击; 导航点; 反舰导弹

**中图分类号:** TJ761 **文献标志码:** A

## Method of Anti-Ship Missile Route Planning Under Multi-Directional Saturation Attacks

Zhang Shuyu<sup>1</sup>, Zhang Jinchun<sup>1</sup>, Li Xuemei<sup>2</sup>

(1. Dept. of Basic, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;  
2. No. 3 Academy of China Aerospace Science & Technology Corporation, Beijing 100074, China)

**Abstract:** For the problem of solving global optimal solution of anti-ship missiles route planning under multi-directional saturation attacks, this paper carries out a reasonable setting of anti-ship missiles route planning under multi-directional saturation attacks. Based on the basic constraint condition of anti-ship missile route planning, establish the route planning model, which can minimum the self-control flight distance, based on this, turn the problem about anti-ship missiles route planning under multi-directional saturation attacks to the problem about solving the key waypoints of anti-ship missiles around it with plane geometry knowledge. The solving method is formulated that can ensure the routes of anti-ship missiles quickly and the simulation is made for validating it. Simulation calculation shows that the method can construct simple routes quickly for anti-ship missiles under multi-directional saturation attacks, which can be up to the requirements for multi-directional attack and beneficial to project implementation.

**Key words:** route planning; saturation attacks; navigation point; anti-ship missile

### 0 引言

饱和攻击战术的概念是 20 世纪 60—70 年代前苏联戈尔什科夫针对美国航母编队而制订的战术提出来的。具体来说就是, 攻击方为了达到战略战术目的, 利用潜艇、舰艇及飞机携带反舰导弹, 采用高密度、连续进袭的突防手段, 同时在极短时间内, 从空中、水面和水下不同方向、不同层次向同一个目标发射超出其抗击能力的导弹数, 使防空系统反导抗击能力在该时间段内处于无法应付的饱和状态, 以达到提高导弹突防概率和摧毁目标的目的, 包括数量饱和与方向饱和<sup>[1]</sup>。

目前对于单枚反舰导弹的航路规划及威胁规避的研究较多<sup>[2-4]</sup>, 但大多数文献没有考虑多枚反舰导弹饱和攻击时的航路约束及入射方向等问题。笔者结合目前对于航路规划技术的研究成果, 在文献[5]中提出的航路规划递推算算法的基础上, 根据平面几

何的相关知识, 提出一种简化的航路规划求解方法。

### 1 反舰导弹航路规划的约束条件<sup>[5]</sup>

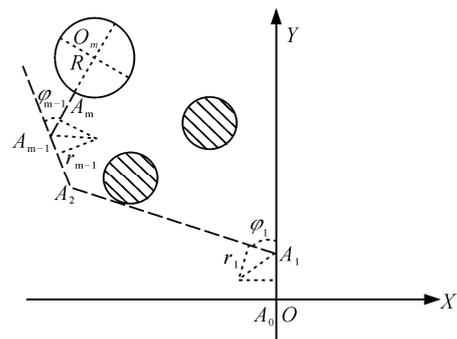


图 1 反舰导弹航路规划

在只考虑二维航路规划的情况下, 以反舰导弹发射点  $A_0$  为原点,  $x$  轴正方向指向东,  $y$  轴正方向指向北, 建立平面参考坐标系。如图 1 所示, 笔者以一枚反舰导弹的航路设定为例, 说明对反舰导弹

收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2012-08-09

作者简介: 张书宇(1987—), 男, 吉林人, 在读硕士, 从事复杂系统的建模与仿真研究。

进行航路规划时需要满足的约束条件。

### 1.1 符号说明

- 1)  $A_0$  表示反舰导弹发射点;
- 2)  $A_i (i=1, 2, \dots, m-1)$  表示第  $i$  个导航点;
- 3)  $A_m$  表示反舰导弹末制导雷达开机点;
- 4)  $O_m$  表示目标点;
- 5)  $R$  表示目标运动范围的半径大小;
- 6)  $r_i (i=1, 2, \dots, m-1)$  表示反舰导弹在  $A_i$  点的转弯半径, 且  $r_i \geq r_{\min}$  ( $r_{\min}$  表示反舰导弹的最小转弯半径);
- 7)  $\varphi_i (i=1, 2, \dots, m-1)$  表示反舰导弹在  $A_i$  点的转向角, 且  $\varphi_i \leq \varphi_{\max}$  ( $\varphi_{\max}$  表示反舰导弹的最大转向角)。

### 1.2 约束条件

- 1) 第 1 个导航点的约束条件:

$$D_{A_0 A_1} \geq r_1 \tan \frac{\varphi_1}{2} + l_p$$

其中:  $D_{A_0 A_1}$  为发射点到第 1 个导航点的距离;  $l_p$  为反舰导弹发射后转入平飞时的最短距离。

- 2) 最后一个导航点的约束条件:

$$D_{A_{m-1} A_m} \geq r_{m-1} \tan \frac{\varphi_{m-1}}{2} + l_w$$

其中:  $D_{A_{m-1} A_m}$  为最后一个导航点到末制导雷达开机点的距离;  $l_w$  为反舰导弹转弯后稳定航向的最短距离。

- 3) 相邻导航点之间的约束条件:

$$D_{A_i A_{i+1}} \geq r_i \tan \frac{\varphi_i}{2} + r_{i+1} \tan \frac{\varphi_{i+1}}{2} + l_w$$

- 4) 反舰导弹自控段总航程的约束条件:

$$D_{A_0 A_1} + \sum_{i=1}^{m-2} (D_{A_i A_{i+1}} - r_i \tan \frac{\varphi_i}{2} - r_{i+1} \tan \frac{\varphi_{i+1}}{2}) + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\varphi_i \pi r_i}{180^\circ} + D_{A_{m-1} A_m} \leq S_{\text{总}}$$

其中,  $S_{\text{总}}$  为反舰导弹自控飞行的最大距离。

## 2 反舰导弹航路规划模型

反舰导弹航路规划的目的是: 在满足各种约束条件的前提下, 规划反舰导弹的飞行航路, 使得航路的特定评价指标达到最优, 从而提高反舰导弹的作战效能。在不考虑威胁规避与飞行代价的前提下,

根据上述约束条件, 可将反舰导弹的航路规划看成是一个以自控飞行距离  $S$  为评价指标的单目标规划问题。

设反舰导弹发射点的坐标为  $A_0(x_0, y_0)$ , 第  $i$  个导航点的坐标为  $A_i(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, m-1)$ , 建立反舰导弹航路规划模型:

$$\begin{aligned} \min S = & \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} + \\ & \sum_{i=1}^{m-2} (\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} - \\ & r_i \tan \frac{\varphi_i}{2} - r_{i+1} \tan \frac{\varphi_{i+1}}{2}) + \\ & \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\varphi_i \pi r_i}{180^\circ} + \sqrt{(x_m - x_{m-1})^2 + (y_m - y_{m-1})^2} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \geq r_1 \tan \frac{\varphi_1}{2} + l_p \\ \sqrt{(x_m - x_{m-1})^2 + (y_m - y_{m-1})^2} \geq r_{m-1} \tan \frac{\varphi_{m-1}}{2} + l_w \\ \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \geq r_i \tan \frac{\varphi_i}{2} + r_{i+1} \tan \frac{\varphi_{i+1}}{2} + l_w \\ x_i \geq 0, y_i \geq 0, r_i \geq r_{\min}, 0 \leq \varphi_i \leq \varphi_{\max} (i=1, 2, \dots, m) \end{cases}$$

## 3 多方向饱和攻击时模型的求解方法

对建立的目标规划模型进行分析可知, 目标函数与约束条件相互耦合, 直接求解比较困难。此外, 当多枚反舰导弹进行多方位饱和攻击时, 根据实际作战情况, 其目标函数和约束条件还会更加复杂。

通过深入分析问题可以发现, 求解各枚反舰导弹航路的过程实质上就是确定其所有导航点的过程。对于饱和攻击的各枚反舰导弹而言, 在确定其攻击方向后, 其末制导雷达开机点与最后一个导航点是满足一定约束条件的, 若使得各枚反舰导弹的发射点和第一个导航点也固定, 则该问题就转化为求解其他导航点坐标的问题<sup>[6]</sup>。按照这一思想, 笔者给出一种简化的求解方法。

### 3.1 第一个导航点的选取

设反舰导弹第一个导航点的坐标为  $A_1(x_1, y_1)$ , 目标点的坐标为  $O_m(x_m, y_m)$ , 按照航路最短的原则, 第一个导航点的选取应便于反舰导弹进行转向攻击。为了简化问题, 这里选取  $A_1(x_1, 0)$  或者  $A_1(0, y_1)$ ,  $x_1$ 、 $y_1$  的符号与目标点的坐标位置有关, 如表 1 所示。

表 1 第一个导航点坐标符号与目标点位置的关系

目标点坐标	$x_{O_m} > 0$	$x_{O_m} < 0$
$y_{O_m} > 0$	$x_1 > 0$	$x_1 < 0$
$y_{O_m} < 0$	$x_1 > 0$	$x_1 < 0$
	$x_1 < 0$	$y_1 < 0$

### 3.2 最后一个导航点的选取

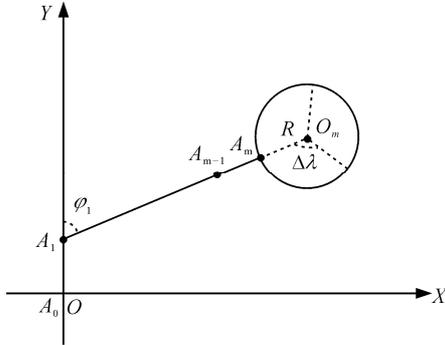


图 2 最后一个导航点选取的示意图

以 3 枚反舰导弹饱和攻击为例，说明最后一个导航点的选取方法，如图 2 所示。首先确定第一枚末制导雷达开机点的坐标  $A_m(x_m, y_m)$ ，根据几何关系

$$\cos \Delta\lambda = \frac{(x_{O_m} - x_m)^2 + (y_{O_m} - y_m)^2 + (x_{O_m} - x)^2 + (y_{O_m} - y)^2 - [(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2]}{2\sqrt{(x_{O_m} - x_m)^2 + (y_{O_m} - y_m)^2} \sqrt{(x_{O_m} - x)^2 + (y_{O_m} - y)^2}}$$

其中， $\Delta\lambda = \frac{2\pi}{n}$  ( $n$  为对目标进行齐射时反舰导弹的个数)。

### 3.3 导航点添加条件

由于受到最大转弯角以及目标点位置的限制，反舰导弹需要进行若干次航向调整才能到达最后一个导航点，从而沿着预定方向攻击目标。当目标点坐标位于阴影部分内部时，反舰导弹经过第 1 个导航点就可以直接攻击目标；当目标点坐标位于阴影部分外时，则需要添加若干个导航点，如图 3 所示。

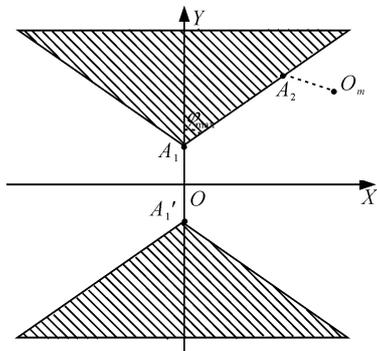


图 3 导航点添加示意图

可知：

$$\begin{cases} (x_m - x_{O_m})^2 + (y_m - y_{O_m})^2 = R^2 \\ y_m = \frac{y_{O_m} - y_1}{x_{O_m} - 0} x_m + y_1 \end{cases}$$

为了简化问题，根据目标规划模型中的约束条件，令  $D_{A_{m-1}} D_{A_m} = r_{m-1} \tan \frac{\varphi_{m-1}}{2} + l_w$ ，则最后一个导航点的坐标  $A_{m-1}(x_{m-1}, y_{m-1})$  满足：

$$\begin{cases} y_{m-1} = \frac{y_{O_m} - y_1}{x_{O_m} - 0} x_{m-1} + y_1 \\ \sqrt{(x_m - x_{m-1})^2 + (y_m - y_{m-1})^2} = r_{m-1} \tan \frac{\varphi_{m-1}}{2} + l_w \\ (x_{m-1} - x_{O_m})^2 + (y_{m-1} - y_{O_m})^2 > R^2 \end{cases}$$

为了实现全方位饱和攻击，第 2 枚反舰导弹末制导雷达开机点的坐标与第 3 枚反舰导弹末制导雷达开机点的坐标应满足：

以图 3 为例，根据几何知识，是否增加导航点的条件为：

1) 当反舰导弹发射点位于  $y$  轴时，

① 当  $\tan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) > 0$  时，

$$\begin{cases} \text{不需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) \geq \frac{\pi}{2} - \varphi_{\max} \text{ 时,} \\ \text{需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) < \frac{\pi}{2} - \varphi_{\max} \text{ 时.} \end{cases}$$

② 当  $\tan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) < 0$  时，

$$\begin{cases} \text{不需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) \leq \frac{\pi}{2} + \varphi_{\max} \text{ 时,} \\ \text{需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) > \frac{\pi}{2} + \varphi_{\max} \text{ 时.} \end{cases}$$

③ 当满足条件①、②时，若下式成立，则需要增加导航点。

$$\arccos \left\{ \frac{(x_{i-1} - x_1)^2 + (y_{i-1} - y_1)^2 + (x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 - [(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2]}{2\sqrt{(x_{i-1} - x_1)^2 + (y_{i-1} - y_1)^2} \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2}} \right\} < \pi - \varphi_{\max}$$

2) 当反舰导弹发射点位于  $x$  轴时,

② 当  $\tan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) < 0$  时,

① 当  $\tan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) > 0$  时,

$$\begin{cases} \text{不需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) < \varphi_{\max} \text{ 时,} \\ \text{需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) \geq \varphi_{\max} \text{ 时.} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{不需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) \geq \pi - \varphi_{\max} \text{ 时,} \\ \text{需要增加导航点} & \text{当 } \arctan(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}) < \pi + \varphi_{\max} \text{ 时.} \end{cases}$$

③ 当满足条件①、②时, 若式成立, 则需要增加导航点。

$$\arccos \left\{ \frac{(x_{i-1} - x_1)^2 + (y_{i-1} - y_1)^2 + (x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 - [(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2]}{2\sqrt{(x_{i-1} - x_1)^2 + (y_{i-1} - y_1)^2} \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2}} \right\} < \pi - \varphi_{\max}$$

### 3.4 新增导航点坐标的计算

几何关系, 新添加导航点的坐标  $A_{i-2}(x_{i-2}, y_{i-2})$  应满

同理, 令  $D_{A_i A_{i+1}} = r_i \tan \frac{\varphi_i}{2} + r_{i+1} \tan \frac{\varphi_{i+1}}{2} + l_w$ , 根据

足如下关系式:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_{i-2} - x_{i-1})^2 + (y_{i-2} - y_{i-1})^2} = r_{i-1} \tan \frac{\varphi_{i-1}}{2} + r_{i-2} \tan \frac{\varphi_{i-2}}{2} + l_w \\ \cos(\pi - \varphi_j) = \frac{(y_{i-1} - y_i)^2 + (x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_{i-2})^2 + (x_{i-1} - x_{i-2})^2 - [(y_i - y_{i-2})^2 + (x_i - x_{i-2})^2]}{2\sqrt{(y_{i-1} - y_i)^2 + (x_{i-1} - x_i)^2} \sqrt{(y_{i-1} - y_{i-2})^2 + (x_{i-1} - x_{i-2})^2}} \end{cases}$$

其中,  $j=1, 2, \dots, i-2$ 。

时的最短距离), 作战区域为  $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ 。设有 3 枚反舰导弹对目标进行饱和攻击, 可知

## 4 算例

### 4.1 作战背景及已知条件设定

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ$$

设定各枚反舰导弹的发射点为  $A(0,0)$ ,  $D_{A_0} D_{A_1} = 50 \text{ km}$  (能满足反舰导弹发射后转入平飞

取  $\varphi = \varphi_{\max}$ ,  $r = r_{\min}$ , 仿真初始条件如表 2 所示。

表 2 仿真初始条件

目标点坐标	导弹转弯半径 $r$	导弹转弯角 $\varphi(^{\circ})$	目标运动范围半径 $R$	反舰导弹 1 第一个导航点坐标	反舰导弹 2 第一个导航点坐标	反舰导弹 3 第一个导航点坐标	转弯后稳定航向的距离 $L_w$
$O_m(200, 200)$	10	60	10	(0,50)	(0,50)	(50,0)	4

### 4.2 仿真结果

首先根据初始条件, 设定各枚反舰导弹最后一个导航点及末制导雷达开几点的坐标, 如表 3 所示。

表 3 各枚反舰导弹的坐标值 km

反舰导弹	最后一个导航点	末制导雷达开机点
反舰导弹 1	(180, 185)	(188, 191)
反舰导弹 2	(195, 236)	(198, 215)
反舰导弹 3	(233, 185)	(213, 194)

然后根据求解步骤中的约束条件, 计算各枚反舰导弹需要增加的导航点个数及其坐标值, 如表 4。

则各枚反舰导弹的全部导航点坐标如表 5。

表 4 各枚反舰导弹的坐标值 km

反舰导弹	增加的导航点 1	增加的导航点 2
反舰导弹 1	—	—
反舰导弹 2	(159, 250)	(126, 229)
反舰导弹 3	(237, 146)	(205, 123)

表 5 各枚反舰导弹的坐标值 km

导航点	反舰导弹 1	反舰导弹 2	反舰导弹 3
第一个导航点	(0, 50)	(0, 50)	(50, 0)
第二个导航点	—	(126, 229)	(205, 123)
第三个导航点	—	(159, 250)	(237, 146)
最后一个导航点	(180, 185)	(195, 236)	(233, 185)
末制导雷达开机点	(188, 191)	(198, 215)	(213, 194)