

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.001

## 近程防御系统指挥控制建模与仿真

王会龙, 李波, 王范范, 段晓稳  
(西北工业大学电子信息学院, 西安 710129)

**摘要:** 针对现有文献中缺少多个舰炮协同拦截多个来袭目标方面研究的问题, 建立一种应对多目标情况下近程防御武器系统模型。通过分析近程防御系统的作战过程, 依次建立相关的雷达模型、舰炮模型和指挥控制模型, 并给出了基于目标飞行时间的威胁评估算法和基于优先级函数的目标分配算法。仿真结果表明: 采用舰炮协同指挥控制提高了舰船整体防御效能, 验证了指挥控制模型的有效性。

**关键词:** 协同指挥控制; 近程防御系统; 威胁评估; 目标分配

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Model and Simulation of Command and Control System of Close in Weapon System

Wang Huilong, Li Bo, Wang Fanfan, Duan Xiaowen  
(School of Electronic & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of articles on multi-guns cooperatively intercepting multi-targets, a close in weapon system (CIWS) model which handle the situation with multi-targets was adopted. According to the analysis of the defense procedure of CIWS, the model of radar, antiaircraft gun and command-control system were established. Threat assessment algorithm based on target flying time and target assignment algorithm based on priority function are given. Simulation results show defense effectiveness improvement of the warship using cooperative command and control system, and verify the validity of the command and control model.

**Keywords:** cooperative command and control; CIWS; threat assessment; target assignment

### 0 引言

近程防御武器系统的概念起源于1960年, 美国海军作战部长提出, 希望能够获得一种有效拦截漏过海麻雀点防御导弹系统的导弹和空中威胁的火炮系统<sup>[1]</sup>。目前国外开发的反导舰炮武器系统已经有十多种, 最典型、装备最多的要数美国的“密集阵”武器系统, 迄今已有700多套系统装备100多个国家的海军部队<sup>[1]</sup>。

近程防御系统采用全自动工作方式, 具有快速反应能力。它能自主地搜索、发现、指示、捕获、跟踪、射击和摧毁目标, 具有一体化的结构、快速的反应时间和减少弹着偏差的闭环校正技术<sup>[2]</sup>。

通过对文献[3-5]的分析研究可以看出, 目前对于近程防御武器系统模型的建模多是采用单座密集阵应对单个反舰导弹的想定, 在此基础上分析不同情况下反舰导弹突防概率; 文献[6]分析了2座“密集阵”同时拦截一个目标的情况, 但尚未见到多个舰炮协同拦截多个来袭目标的研究。

基于此, 笔者在分析近程防御系统作战过程的基础上, 通过引入指挥控制模型, 对目标进行威胁评估和分配, 在多目标情况时, 可以有效调度舰炮, 实现协同防御, 从而减小来袭目标的突防概率, 提

高近程防御系统的整体作战效能。

### 1 近程防御系统作战过程

如图1所示, 近程防御系统的作战过程主要包括以下3个步骤:

- 1) 搜索、发现、跟踪目标: 该过程由对应的雷达模块实现。
- 2) 选择舰炮拦截威胁目标: 该过程由对应的指挥控制模块完成, 包括目标的威胁评估和分配。
- 3) 舰炮拦截已分配的目标: 该过程由对应的舰炮模块实现。

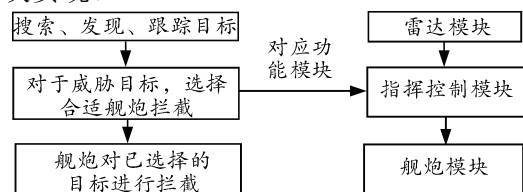


图1 近程防御系统作战过程

### 2 雷达模型

#### 2.1 搜索雷达模型

参考文献[5], 建立搜索雷达模型如下:

$$D_r = D + D_{st} \tan(\varepsilon)\eta$$

其中:  $D_r$  为搜索雷达给出的目标位置;  $D$  为目标的

收稿日期: 2014-02-12; 修回日期: 2014-03-06

基金项目: 航天技术支撑基金(2013-HT-XGD); 西北工业大学基础研究基金(JC201144)资助项目

作者简介: 王会龙(1990—), 男, 河北人, 硕士, 从事现代火力控制理论研究。

真实位置； $D_{st}$  为目标与搜索雷达的距离； $\varepsilon$  为搜索雷达的精度； $\eta$  是取值范围为 $[-1,1]$ ，并服从均匀分布的随机值。

### 2.2 跟踪雷达模型

搜索雷达发现目标后，指挥仪控制舰炮转向目标，炮架旋转到目标指示的角度进行 8 字型搜索。

满足下列条件时，认为目标进入雷达跟踪区域：

$$\begin{aligned} D_{s \min} < D < D_{s \max} \\ \theta_{s \min} < \theta < \theta_{s \max} \\ |\varphi| < \varphi_{s \max} \end{aligned}$$

其中： $D$  为目标到舰船的距离； $\varphi$ 、 $\theta$  为目标相对于舰船的方位角、俯仰角； $D_{s \max}$ 、 $D_{s \min}$  为可以跟踪的最大距离和最小距离； $\varphi_{s \max}$  为最大方位角； $\theta_{s \max}$ 、 $\theta_{s \min}$  为最大和最小俯仰角。

在此基础上满足下列条件，跟踪雷达捕获目标：

$$\begin{aligned} |\dot{\varphi}| < \dot{\varphi}_{s \max}, \quad |\dot{\theta}| < \dot{\theta}_{s \max} \\ |\ddot{\varphi}| < \ddot{\varphi}_{s \max}, \quad |\ddot{\theta}| < \ddot{\theta}_{s \max} \end{aligned}$$

其中： $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\theta}$  为目标相对于舰船的角速度； $\ddot{\varphi}$ 、 $\ddot{\theta}$  为目标相对于舰船的角加速度； $\dot{\varphi}_{s \max}$ 、 $\dot{\theta}_{s \max}$  为水平和垂直方向的旋转角速度最大值； $\ddot{\varphi}_{s \max}$ 、 $\ddot{\theta}_{s \max}$  为水平和垂直方向的旋转角加速度最大值。

## 3 舰炮模型

舰炮模型的主要功能是完成开火时机的判断、解决射击任务、停火时机的判断。

### 3.1 开火时机判断

当目标相对于舰炮的优先级最高，且目标在舰炮作用区域内时，可以发射。

### 3.2 解决射击任务

对于解命中问题，采用迭代法求解炮弹的发射方向和命中点位置。弹丸飞行时间和飞行距离采用射表插值求解。

### 3.3 停火时机判断

当满足下列条件时，高炮停止射击：

- 1) 舰炮所分配的目标发生变化；
- 2) 目标飞离高炮作用区域；
- 3) 完成一次连续射击或弹药用完。

## 4 指挥控制模型

在目标的发现、跟踪以及拦截过程中，指挥控制模型动态地完成目标威胁评估和目标分配。其工作流程如图 2 所示。

指挥控制模型主要完成 2 方面功能：威胁评估

和目标分配。根据雷达得到的目标信息对目标进行威胁评估，对于威胁目标，根据当前配置的舰炮，将目标分配给最合适进行拦截的舰炮。

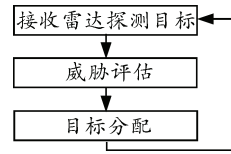


图 2 指挥控制模型工作流程

### 4.1 威胁评估

将靠近舰船的目标分为 2 类：具有威胁的目标和没有威胁的目标。

如图 3 所示，目标速度  $v$  与目标与舰船的连线  $OT$  之间的夹角为  $\varphi$ ，机动的最小半径为  $R$ ，以  $R$  为半径机动的轨迹与  $OT$  交于  $P$  点。当目标满足以下条件时，认为其是具有威胁的：

$$\begin{aligned} D < D_{s \max} \\ |\varphi| < \varphi_{s \max} \\ D < N \cdot g \cdot T_f^2 \end{aligned} \tag{1}$$

其中： $D$  为舰船到目标的距离； $N$  为目标的机动过载； $g$  为重力加速度； $T_f$  为目标到舰船的飞行时间，满足： $T_f = D / (v \cos \varphi)$ 。

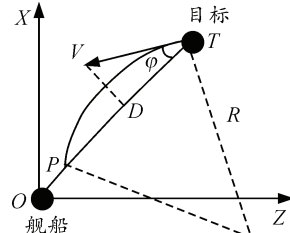


图 3 目标威胁判定

式 (1) 判定在当前距离和速度条件下，目标可以命中舰船。

### 4.2 目标分配

#### 4.2.1 优先级计算

将靠近舰船的目标按照飞行时间  $T_f$  排序，当  $T_f$  越小时，目标威胁越大。首先处理威胁大的目标，选择对目标的优先级最大的舰炮进行拦截。然后依次处理威胁较小的目标，使每一个目标都选取最适合拦截的舰炮。

计算优先级借助优先级函数

$$K_{(i_G, i_M)} = (L_{(i_G, i_M)}, N_{i_G}, C_{(i_G, i_M)})$$

其中： $i_G$ 、 $i_M$  为舰炮和目标序号； $L_{(i_G, i_M)}$  为舰炮对目标的优先级别； $N_{i_G}$  为舰炮可攻击的目标数目； $C_{(i_G, i_M)}$  为瞄准线相对舰炮作用区域中线的偏差角余弦值。

通过公式 (2) 从 2 个备选舰炮  $i_{G1}$ 、 $i_{G2}$  中选取最佳的舰炮对目标  $i_M$  进行射击：

$$i_G = \begin{cases} i_{G1}, & L_{(i_{G1}, i_M)} > L_{(i_{G2}, i_M)} \\ i_{G1}, & L_{(i_{G1}, i_M)} = L_{(i_{G2}, i_M)} \& N_{i_{G2}} > N_{i_{G1}} \\ i_{G1}, & L_{(i_{G1}, i_M)} = L_{(i_{G2}, i_M)} \& N_{i_{G2}} = N_{i_{G1}} \\ & \& C_{(i_{G1}, i_M)} > C_{(i_{G2}, i_M)} \\ i_{G2}, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$L_{(i_G, i_M)}$  的计算方法如下：

1) 当前舰炮未分配目标。

当进行第一次目标分配时，此时各舰炮都没有分配可以拦截的目标， $L_{(i_G, i_M)}$  由下式给出：

$$L_{(i_G, i_M)} = \begin{cases} 0, & i_R = 0 \\ 2, & i_R = 1 \& D_p(T_B + T_{zb}) > D_B \\ 5, & i_R = 1 \& D_p(T_B + T_{zb}) \leq D_B \end{cases}$$

$L_{(i_G, i_M)} = 0$  时，舰炮无法拦截目标；

$L_{(i_G, i_M)} > 0$  时，根据不同情况设置了舰炮对目标的不同优先级别。

设雷达的反应时间为  $T_{r0}$ ，调弦时间为  $T_{r1}$ ，捕获目标时间为  $T_{r2}$ ，则高炮的总反应时间为  $T_{z1} = T_{r0} + T_{r1} + T_{r2}$ ；设高炮重新装载时间为  $T_{reload}$

$$T_{zb} = \max(T_{z1}, T_{reload})$$

$$i_R = \begin{cases} 1, & i_s = 1 \& i_u(T_L) = 1 \\ & \& T_{zb} \leq T_f \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

当  $i_s = 1$ 、 $i_u(T_L) = 1$  都满足并且飞行时间不小于反应时间时， $i_R$  取 1，表示舰炮可以跟踪并拦截目标；其余情况则取 0。

$$i_s = \begin{cases} 1, & D_p(T_{r0}) \leq D_{smax} \& D_p(T_{zb}) \leq D_{smin} \\ & \& |\phi| < \phi_{smax} \& \theta_{smin} < \theta < \theta_{smax} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$i_s = 1$  表示目标在跟踪范围之内，且可以跟踪。

$$i_u(t) = \begin{cases} 1, & |\phi| < \phi_{u\max} \& \theta_{u\min} < \theta < \theta_{u\max} \\ & \& D_p(t) \geq D_L \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

式中： $i_u(T_L) = 1$  表示目标在舰炮作用范围之内； $\phi_{u\max}$  为高炮最大方位角； $\theta_{u\min}$ 、 $\theta_{u\max}$  为高炮最小和最大俯仰角； $D_L$ 、 $D_B$  为炮弹最短、最长射程； $T_L$ 、 $T_B$  为炮弹飞过  $D_L$ 、 $D_B$  所需时间。

运用下式计算  $D_p(t)$ ：

$$D_p(t) = D + \dot{D}t$$

2) 当前舰炮已分配目标。

在指挥控制模型工作的过程中，会不断接收目标的信息和各舰炮的信息，形成新的目标分配。上

一次分配给舰炮的目标在此次分配过程中相对于舰炮的优先级  $L_{(i_G, i_M)}$  由下式给出：

$$L_{(i_G, i_M)} = \begin{cases} 0, & i_{su2} = 0 \& i_{su1} = 0 \\ 1, & i_{su2} = 0 \& i_{su1} = 1 \& T_{reload} > T_{zt} \\ & \& D_p(T_{zbt} + T_B) > D_b \\ 3, & i_{su2} = 0 \& i_{su1} = 1 \& T_{reload} \leq T_{zt} \\ & \& D_p(T_{zbt} + T_B) > D_b \\ 4, & i_{su2} = 0 \& i_{su1} = 1 \& T_{reload} > T_{zt} \\ & \& D_p(T_{zbt} + T_B) < D_b \\ 6, & i_{su2} = 0 \& i_{su1} = 1 \& T_{reload} \leq T_{zt} \\ & \& D_p(T_{zbt} + T_B) < D_b \\ 7, & i_{su2} = 1 \end{cases}$$

式中  $T_{zbt} = \max(T_{r0} + T_{r1} + T_{r2}, T_{reload})$ ，即剩余的发射时间。

$$i_{su1} = \begin{cases} 1, & T_{zt} < T_f \& D_p(T_{zbt}) \geq D_{smin} \\ & \& i_u(T_{zbt} + T_L) = 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$i_{su1} = 1$  和  $i_R = 1$  的情形相同，保证舰炮可以跟踪并且拦截目标。

$$i_{su2} = \begin{cases} 1, & T_{r0} \leq 0 \& T_{r1} \leq 0 \\ & \& T_{r2} \leq 0 \& T_{reload} \leq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$i_{su2} = 1$  表明舰炮此时已完成射击任务，可以进行发射。

$N_{i_G}$  的计算方法如下：

$$N_{i_G} = \sum_{i_G \in C_0} S(L_{(i_G, i_M)})$$

这里  $S(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$ 。

#### 4.2.2 目标分配

舰载高炮的目标分配算法步骤如下：

1) 根据 4.1 节，将目标分成 2 类，对威胁目标按照飞行时间从小到大进行排序。

2) 根据 4.2.1 节，计算所有威胁目标和当前所有舰炮的优先级函数  $K_{(i_G, i_M)} = (L_{(i_G, i_M)}, N_{i_G}, C_{(i_G, i_M)})$ 。

3) 遍历所有威胁目标，目标的威胁按飞行时间从小到大逐渐降低；因此，首先处理威胁大的目标。对于选择的目标  $i_M$ ，遍历剩余可用舰炮，选取优先级最大的舰炮  $i_{G0}$ ，得到目标分配结果  $i_{GM} = (i_M, i_{G0})$ 。

4) 若对于选择的目标  $i_M$ ，剩余无可用舰炮，则转入执行步骤 3。已经得到分配的目标和舰炮则是本次目标分配的结果。

### 5 仿真分析

进行仿真时，作以下设定：不考虑环境影响；

雷达发现、跟踪目标的概率为 1，不考虑虚警率；舰船和导弹的末端运动都为匀速直线运动。

近程防御高炮以“密集阵”为例，具体参数来源于文献[1]。

以“尼米兹”级航母为例，如图 4 所示，航母初始位置位于原点(0,0,0)，以 10 m/s 速度正北航行。装备 3 座 MK15 密集阵，密集阵 1( $G_1$ )指向 Z 轴正向，密集阵 2( $G_2$ )指向北偏西 45°，密集阵 3( $G_3$ )北偏西 135°。密集阵最大方位角为±90°，最大俯仰角 85°，最小俯仰角 15°。

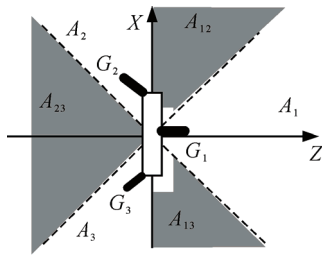


图 4 舰船高炮配置

由各密集阵的最大方位角得到的各舰炮的防区： $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  的专属防区； $A_{12}$  为  $G_1$ 、 $G_2$  的共同防区； $A_{13}$  为  $G_1$ 、 $G_3$  的共同防区； $A_{23}$  为  $G_2$ 、 $G_3$  的共同防区。

设雷达发现多个目标，各目标位置和速度信息如下：

- 目标  $T_1$ ：位置(6 000,0,0)，速度(-510,0,0)；
- 目标  $T_2$ ：位置(0,0,6 000)，速度(0,0,-510)；
- 目标  $T_3$ ：位置(-6 000,0,0)，速度(510,0,0)；
- 目标  $T_4$ ：位置(0,0,-6 000)，速度(0,0,-510)；
- 目标  $T_5$ ：位置(4 242, 0, 4 242)，速度(-367.64, 0, 367.64)；

指挥控制模型对目标进行威胁评估，得到的威胁目标为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 。

经过威胁评估，选择最具威胁且舰炮可以拦截的 3 个目标  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  进行拦截。仿真计算各时刻目标相对于舰炮的优先级函数。选取初始时刻和仿真进行到 8 s 时得到的结果如表 1 所示。

表 1 目标相对于舰炮优先级函数

威胁目标	初始时刻			仿真 8s		
	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$
$T_1$	(2,3,0)	(2,1,0.71)	(0,1,-0.71)	(6,3,0)	(6,1,0.71)	(0,1,-0.71)
$T_2$	(2,3,1)	(0,1,-0.71)	(0,1,-0.71)	(6,3,1)	(0,1,-0.71)	(0,1,-0.71)
$T_3$	(2,3,0)	(0,1,-0.71)	(2,1,0.71)	(6,3,0)	(0,1,-0.71)	(6,1,0.71)

根据优先级函数，得到目标分配方案如表 2。

表 2 目标分配方案

威胁目标	分配方案	
	初始时刻	仿真 8 s
$T_1$	$G_2$	$G_2$
$T_2$	$G_1$	$G_1$
$T_3$	$G_3$	$G_3$

通过表 1、2 可以看到，在多目标突防的过程中，指挥控制系统可以动态地根据目标信息和配置的舰炮信息完成目标威胁评估和分配。在仿真的全过程中，各目标相对于舰炮的优先级函数在不断变化，而根据优先级函数得到的目标分配方案也在不断更新，所以每时每刻的分配结果总是最优的，即可以协同所有舰炮，拦截威胁目标，从而保证整个作战过程中的目标分配方案是最优的，可以最大限度地调度舰炮拦截目标，提高近程防御系统的作战效能。

同时，假设在没有指挥控制模型的情况下，各舰炮单独拦截对舰船威胁最大的目标，相应的目标分配方案如表 3 所示。

表 3 舰炮单独拦截时的目标分配

威胁目标	分配方案	
	初始时刻	仿真 8 s
$T_1$	$G_2, G_1$	$G_2, G_1$
$T_2$	—	—
$T_3$	$G_3$	$G_3$

对比表 2 分析可以看到：指挥控制模型可以充分调度舰炮对所有目标进行拦截，避免了多个舰炮拦截同一目标而导致其余目标无阻碍突防的情况。

## 6 结束语

在分析近程防御系统作战过程的基础上，笔者对指挥控制模块进行了完整的建模，结合雷达模型、舰炮模型进行仿真并验证了指挥控制模型有效性。在应对多目标突防时，采用舰炮协同指挥控制模型可以充分调度舰炮，减小目标突防概率，提高舰船整体作战效能。

## 参考文献：

- [1] 梁国明. 美国密集阵近程防御武器系统综述[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2000(5): 1-21.
- [2] 《国外反导舰炮武器系统》编委会编. 国外反导舰炮武器系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 5-9.
- [3] 宋贵宝, 孔丽, 李红亮, 等. 密集阵反导系统拦截反舰导弹模型研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2128-2130.
- [4] 李新国, 陈进. 反舰导弹末端突防对策与仿真[J]. 飞行力学, 2002, 20(3): 29-31.
- [5] 王庆江, 高晓光. 反舰导弹末端机动突防“密集阵”系统的模型与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1390-1393.
- [6] 曹彪, 张今春, 傅鲁江. 反舰导弹末端机动突防密集阵研究[J]. 战术导弹技术, 2010(6): 24-28.