

doi: 10.7690/bgzdh.2014.03.008

突击潜艇对航母可生存性影响建模分析

于凤全¹, 周晓光², 赵仁厚², 张原²

(1. 海军航空兵学院空中领航与勤务系, 辽宁 葫芦岛 125001;
2. 海军航空兵学院模拟训练系, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 针对航母与突击潜艇之间作战问题的复杂性, 以及航母可生存性评估的重要性, 提出一种基于概率统计的突击潜艇对航母可生存性影响评估方法。对航母与突击潜艇对抗作战流程进行描述, 分析对抗过程中的关键事件, 定义相关的描述变量; 对航母可生存概率、航母受多次攻击的概率和突击潜艇毁伤数量期望等描述对抗效能的计算公式进行推导, 并通过实例进行仿真分析。仿真结果表明, 提升航母编队反潜力量的作战能力以及自身的防护能力是提升航母可生存性的关键。

关键词: 潜艇; 航母; 可生存性

中图分类号: TJ67 **文献标志码:** A

Modeling and Analysis on Survivability of Aircraft Carrier Attacked by Strike Submarine

Yu Fengquan¹, Zhou Xiaoguang², Zhao Renhou², Zhang Yuan²

(1. Department of Aerial Navigator & Service, Naval Air Force Academy, Huludao 125001, China;
2. Department of Simulation & Training, Naval Air Force Academy, Huludao 125001, China)

Abstract: Aiming at the complex situation of battle between aircraft carrier and strike submarine and importance of aircraft carrier survivability evaluation, put forwards a survivability evaluation method of aircraft carrier attacked by strike submarine based on probability statistics. Firstly, describe the battle process between aircraft carrier and strike submarine, analyze key event in confrontation and define the relative description variable. Secondly, the mathematical derivations of the probability of survivability of carrier aircraft, probability of carrier aircraft suffered many times successful attacks, the expected number of submarines killed up is given. Finally a type example is given, computational results show that the anti-submarine capability of anti-submarine system and the defend capability of carrier aircraft is the key to promote the survivability of carrier aircraft.

Keywords: submarine; carrier aircraft; survivability

0 前言

航母和潜艇作为现代海战的主要兵力, 在现代海战中都发挥着不可替代的作用。潜艇作为航母的主要对抗力量之一, 是航母可生存性的主要威胁对象。研究突击潜艇对航母可生存性影响对于构建航母编队反潜力量和运筹反潜作战行动具有重要意义。文献[1]对航母编队构建多层反潜作战体系的必要性进行了分析; 文献[2]提出了衡量潜艇攻击航母编队的作战能力的方法; 文献[3]从定性角度对航母反潜能力进行了分析。反潜作战一直是军事运筹学研究的重点^[4-9]。笔者在前人研究的基础上, 对潜艇对航母可生存性影响问题进行了研究。

1 问题描述

1.1 敌潜艇攻击航母

由于具有隐蔽性好、作战半径大、突击能力强

的战术特点, 潜艇一直是突击航母编队战斗机群的主要作战兵力^[10]。潜艇兵力以单艇或者小群使用为主, 潜艇群选择合适的突破时间间隙, 利用航母编队多层防御之间的间隙, 隐蔽突破航母编队防御体系并占领攻击阵位, 发射鱼雷或者潜射导弹对航母实施打击。

1.2 航母反潜作战

航母编队集多种反潜兵力、武器于一身, 通过立体、大纵深、多方位对潜预警和侦察网络的侦察保障, 通过其他兵力兵器的支援, 在信息化指挥控制系统的指挥控制下, 以各种方式实施反潜作战。航母反潜多层防御体系如图 1^[11-12]所示。

2 突击潜艇与航母对抗作战建模

在某特定海域, 一段时间内突击潜艇与航母对抗作战过程十分复杂, 难以详尽描述, 因此笔者采

收稿日期: 2013-10-11; 修回日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(军事学)课题“舰载机作战运筹分析”(12HJ2D6-×××)

作者简介: 于凤全(1972—), 男, 教授, 从事装备仿真、作战建模研究。

用概率统计方法对突击潜艇与航母对抗过程进行描述。假定突击潜艇成功实现突击航母编队多层反潜防御体系，占领攻击阵位的概率为 b ；突击潜艇在攻击阵位对航母成功实施打击行动的概率为 h ；突击潜艇在实施对航母打击失败情况下的损耗率为 a ；突击潜艇无条件损耗率为 S ，即指所有条件下的突击潜艇损耗率；航母可承受突击潜艇的最大攻击次数为 N ；初始时刻突击潜艇的数量为 x_0 ；附加攻击潜艇进入作战海域的概率为 r ； t 时刻攻击潜艇由于受反潜作战力量而毁伤数量期望为 $K(t)$ ；在 $t=0, 2, \dots, N$ 时刻，突击潜艇成功对航母实施 n 次打击的概率为 $P_n(t)$ ；在 $t=0, 2, \dots, N$ 时刻，攻击潜艇成功对航母实施 $\leq n$ 次打击的概率为 $\pi_n(t)$ 。

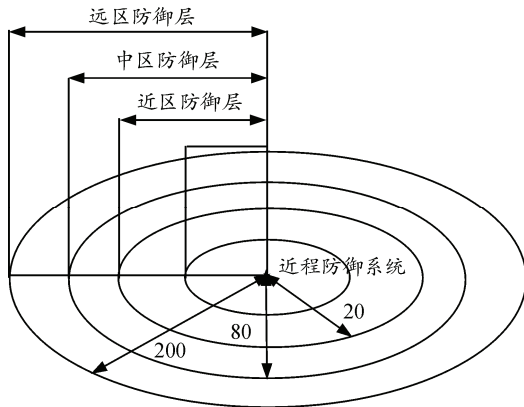


图 1 航母编队反潜多层防御体系

建模过程中假设以下条件存在：1) 突击潜艇成功实现突击航母编队多层反潜防御体系，占领攻击阵位的概率为定值；2) 突击潜艇在攻击阵位对航母成功实施打击行动的概率为一定值，同样，假定航母编队的反潜力量对潜艇的摧毁概率也为定值；3) 只要航母仍处于作战区域部署状态，那么潜艇的损耗率为一定值；4) 攻击潜艇的属性一致，且作战行动之间相互独立。

突击潜艇成功突击多层反潜防御体系，占领攻击阵位概率 b 与攻击潜艇所携带的武器相关，假定潜艇装载的武器有导弹 2 种：一种是；另一种是鱼雷。对于导弹潜艇，当突击潜艇与航母部署位置之间满足潜艇指挥官确保发射要求时，便可以认为潜艇突破了防御体系；对于鱼雷潜艇，只有距离满足鱼雷发射要求时，才能认为成功突破。导弹潜艇相对于鱼雷潜艇而言，由于发射武器所需距离较远，所需突破距离近，因此导弹潜艇成功突破航母编队防御体系的概率相对高。

文中所定义的潜艇损耗率是在特定情况下由航母编队反潜力量所造成的。 a 为没有成功对航母实施打击条件下的突击潜艇损耗率，主要指潜艇成功突破多层反潜防御体系，占领攻击阵位后，潜艇未能实施成功打击的条件下的潜艇损耗，不包括成功打击事件下的损耗问题。 S 包含了突击潜艇成功实施对航母打击条件下的损耗率。

2.1 航母未受攻击的概率

假定在时刻 t ，航母没有受到攻击潜艇的成功攻击，那么经过 ∇t 后，航母仍没有受到成功攻击的概率为：

$$P_0(dt|t) = 1 - bx(t)hdt \tag{1}$$

其中： $x(t)$ 为突击潜艇数量； b 为突击潜艇与航母遭遇概率，即突击潜艇占领攻击阵位的概率； h 为突击潜艇在攻击阵位对航母成功实施打击行动的概率。

所以有：

$$P_0(t+dt) = P_0(t)P_0(dt|t) = P_0(t)[1 - bx(t)hdt] \tag{2}$$

且

$$dP_0(t) = P_0(t+dt) - P_0(t) = -bhx(t)P_0(t)dt \tag{3}$$

对式 (3) 两边进行积分可得：

$$\int_1^{P_0(t)} \frac{dP_0}{P_0} = -bh \int_0^t x(t)dt \tag{4}$$

求解得：

$$P_0(t) = \exp \left\{ -bh \int_0^t x(t)dt \right\} \tag{5}$$

$x(t)$ 满足以下方程：

$$\frac{dx}{dt} = -ax + r \tag{6}$$

求解上述方程有：

$$x(t) = \frac{r}{a} + e^{-at} \left(x_0 - \frac{r}{a} \right) \tag{7}$$

将公式 (7) 代入到公式 (5) 中，有

$$P_0(t) = \exp \left[\frac{-bh}{a} \left[rt + \left(x_0 - \frac{r}{a} \right) (1 - e^{-at}) \right] \right] \tag{8}$$

当 $r=0$ ，即没有附加突击潜艇进入该作战区域的情况下：

$$P_0(t) = \exp \left[\frac{-bhx_0}{a} (1 - e^{-at}) \right] \tag{9}$$

2.2 航母遭受 n 次攻击的概率

以下对 $P_n(t)$ 进行推导，即到达时刻 t ，航母受到突击潜艇 n 次成功攻击的概率。定义 $P_0(t-T)$ 为在时间段 $[t, T]$ 内，航母没有受到攻击的概率。那么根据对公式 (8) 的推导，可以直接给出 $P_0(t-T)$ 的表达式如下：

$$P_0(t) = \exp\left[-\frac{bh}{a}\left[r(t-T) + \left(x(T) - \frac{r}{a}\right)(1 - e^{-a-T})\right]\right] \quad (10)$$

根据定义，可知：

$$P_0(t-T)P_0(T) = P_0(t) \quad (11)$$

在 $n \leq N$ 的情况下：

$$P_n(t) = \int_{t_n}^t \cdots \int_{t_1=0}^{t_2} P_0(t-t_n) [bhx(t_n) dt_n P(t_n-t_{n-1})] \cdots [bhx(t_1) dt_1 P_0(t_1)] \quad (12)$$

根据公式 (11)，对公式 (12) 进行约简有：

$$P_n(t) = P_0(t) \int_{t_n}^t \cdots \int_{t_1=0}^{t_2} bhx(t_n) dt_n \cdots bhx(t_1) dt_1 \quad (13)$$

根据公式 (3) 有：

$$bhx(t_i) = -\frac{1}{P_0(t_i)} \frac{dP_0(t_i)}{dt_i} = -\frac{d(\ln P_0(t_i))}{dt_i} \quad (14)$$

将公式 (14) 代入到 (13)，可以求得：

$$P_n(t) = P_0(t) \frac{[-\ln P_0(t)]^n}{n!} \quad (15)$$

公式 (15) 给出了航母受到 n 次攻击的概率。到达 t 时刻，航母受到 $\leq N$ 攻击的概率为

$$\pi_n(t) = \sum_{n=0}^N P_n(t) \quad (16)$$

2.3 攻击潜艇毁伤数量期望

以下推导到达时刻 t ，突击潜艇成功实施攻击后受航母反潜作战力量打击毁伤数量的期望值 $K(t)$ ，

$$\frac{dK(t)}{dt} = \pi_N Sx(t) \quad (17)$$

根据公式(14)~式 (16) 有：

$$\frac{dK(t)}{dt} = -\frac{S}{bh} \frac{dP_0}{dt} \sum_{n=0}^N \frac{[-\ln P_0(t)]^n}{n!} \quad (18)$$

因此

$$K(t) = -\frac{S}{bh} \sum_{n=0}^N \int_1^{P_0(t)} \frac{[-\ln P_0(t)]^n}{n!} dP_0 \quad (19)$$

因为

$$\sum_{n=0}^N \int_1^{P_0(t)} \frac{[-\ln P_0(t)]^n}{n!} dP_0 = \pi_n - 1$$

所以

$$K(t) = \frac{S}{bh} \sum_{n=0}^N [1 - \pi_n(t)] \quad (20)$$

3 仿真分析及对策建议

3.1 基本想定

为对仿真进行对比分析，假定某海域部署有 2 类航母：一类为有护航的航母；另一类为没有护航的航母。有护航的航母，反潜力量携带的各种传感器，提升了航母编队探测潜艇的能力，对潜艇的探测距离大。攻击潜艇也有 2 类：一类为装载鱼雷的潜艇；另一类为装载导弹的潜艇。在航母与攻击潜艇遭遇后，作战结果如表 1 所示。

表 1 作战基本想定设计

作战想定	潜艇毁伤	航母毁伤	
		是	否
护航航母+鱼雷潜艇	是	0.21	0.29
	否	0.09	0.41
非护航航母+鱼雷潜艇	是	0.15	0
	否	0.85	0
非护航航母+导弹潜艇	是	0.05	0.10
	否	0.28	0.57

1) 在想定 1：护航航母+鱼雷攻击潜艇。

假定 $b=0.25$ ；

根据定义可知：

$a=b \times P(\text{潜艇受攻击}/\text{航母未受到攻击}) +$

其他原因导致的潜艇毁伤=0.12

$h=P(\text{给定遭遇条件下航母受到攻击})=0.3$

$S=\text{非条件限制潜艇毁伤率} =$

$0.25 \times (0.21 + 0.29) + 0.05 = 0.18$

2) 在想定 2：非护航航母+鱼雷攻击潜艇。

假定 $b=0.025$ ；

根据定义可知： $a=0.02 \times 0 + 0.05 = 0.05$

$h=1$

$S=0.05$

3) 在想定 3：非护航航母+导弹攻击潜艇。

假定 $b=0.02$ ；

根据定义可知：

$a=0.25 \times 0.1 + 0.05 = 0.075$

$h=0.33$

$S=0.09$

3.2 仿真结果

假定 $x_0=5, r=0$ ，根据以上 3 种想定的计算结果，应用公式 (9)、(16)、(20)，作战仿真结果如表 2。

表 2 作战仿真结果统计

变量	护航航母 VS 鱼雷攻击潜艇	非护航航母 VS 鱼雷攻击潜艇	非护航航母 VS 导弹攻击潜艇
遭遇率 b	0.25	0.25	0.250
潜艇条件损耗率 a	0.12	0.05	0.075
潜艇损耗率 S	0.18	0.05	0.090
在给定遭遇对象下的成功攻击率 h	0.30	1.00	0.330
交换率 $R(N=0)$	2.30	2.70	1.100
交换率 $R(N=1)$	4.70	5.30	2.100
在 $N=0$ 条件下 $t=10$ 后航母仍存活的概率 $\pi_0(10)$	0.12	0.45	0.060
在 $N=1$ 条件下 $t=10$ 后航母仍存活的概率 $\pi_1(10)$	0.36	0.81	0.210

航母具有一定的抗突击潜艇打击能力，根据表 2 的仿真结果，假定航母可抗打击能力为 0，即遭受一次打击后便失去战斗力，退出作战海域，那么依据公式 (9) 计算航母可生存概率的结果如图 2 所示。假定航母可承受的打击次数为 1，即航母遭受突击潜艇一次打击后仍有作战能力，遭受 2 次打击后才失去作战能力，退出作战区域，依据公式 (16) 计算航母可生存概率的结果如图 3 所示。

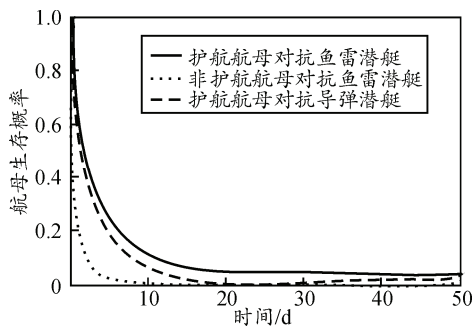


图 2 航母可生存概率 ($N=0$)

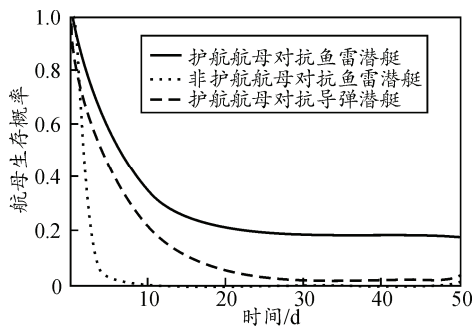


图 3 航母可生存概率 ($N=1$)

从仿真结果图 2 可以看出，非护航航母相对于有护航航母的可生存概率较低，随着作战时间的加大，可生存概率为 0，因此必须为航母编配反潜作战力量，提升反潜能力。对比图 2 和图 3 可知，在有护航的条件下，航母可抗打击能力增强，可大大提升航母的可生存能力，在作战时间 $t=50$ ，护航对抗鱼雷潜艇的想定下，由于提升了航母抗打击能力，航母的可生存概率从 4.7% 提升至 18.24%，大大提

升了航母的可生存概率。

4 结束语

笔者对突击潜艇对航母可生存性影响进行了分析，提出了一个用于评估航母可生存性的概率统计模型，并应用典型案例，分析了不同条件下突击潜艇对航母可生存性的影响。仿真结果表明，提升航母编队反潜作战能力、抗打击能力是提升航母可生存性的关键。文中所构建模型，其仿真粒度较粗，仿真想定较简单，下一步的工作是进一步细化模型，期望为航母编队反潜作战提供优化指导。

参考文献:

- [1] 冯申, 袁彩锦. 航母战斗群与潜艇群对抗的建模分析 [C]. 复杂电磁环境下的作战、训练、保障与军事运筹研究, 军事科学出版社, 2008: 335-338.
- [2] 顾建良. 潜艇编队攻击航空母舰编队作战能力计算概述 [J]. 海军装备, 1994, 8(2): 23-26.
- [3] 孙茂军, 纪金耀. 美国海军航空母舰突击群反潜作战能力分析 [J]. 潜艇学术研究, 2002, 8(4): 78-80.
- [4] 张最良, 李长生. 军事运筹学 [M]. 北京: 军事科学出版社, 1998: 56-60.
- [5] 冯百胜, 周晓光. 基于随机兰彻斯特理论的舰载机空战效能分析 [J]. 计算机技术与发展, 2013(2): 218-220.
- [6] 胡浩然, 王俊. 信息化条件下时滞兰彻斯特方程 [J]. 兵工自动化, 2012, 31(7): 72-73.
- [7] J.V.Hall. A model of carrier-submarine interactions [D]. Arlington: Center for Naval Analyses, 1970: 33-36.
- [8] 付宾, 罗伟林. 基于 LSSVM-PID 的船舶航向控制 [J]. 机电工程, 2013, 30(5): 632-635.
- [9] 孙明太. 航空反潜装备 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 69-74.
- [10] 李登峰, 许藤. 海军作战运筹分析及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 332-336.
- [11] 林平, 刘永辉. 国外航空母舰作战使用与力量建设 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2010: 456-460.
- [12] 刘永辉. 国外航空母舰作战指挥 [M]. 北京: 军事科学院出版社, 2007: 65-70.