

## 舰艇编队防空过程建模及分析\*

黄金才,陈洒然,程光权

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室,湖南长沙 410073)

**摘要:**防空作战是大型水面舰艇编队的主要作战样式之一。运用PEPA(性能评价过程代数)方法对舰艇编队防空作战全过程进行有效建模,形式化描述了预警探测、情报传递、命令下达、防空拦截等作战主要过程。建立的PEPA模型具有层次化结构,考虑了要素间相互协作,体现了编队防空作战分布、并发的特点。通过对建立的PEPA模型进行性能指标选择和稳定状态分析,得到了不同因素对编队能力发挥的影响情况,获得了防空作战的基本要素组成,从而提供了一种解决舰艇编队问题的新方法。

**关键词:**性能评价过程代数;舰艇编队;防空作战;建模分析

**中图分类号:**TP316 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)03-0184-07

## Modeling and analysis of air defense process for warship formation

HUANG Jincui, CHEN Saran, CHENG Guangquan

(Science and Technology on Information System Engineering Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Air defense is a basic operational pattern of large surface warship formation. The PEPA (Performance Evaluation Process Algebra) method was applied to model the whole-process air defense operation of surface warship formation. The main air defense process, such as early warning, information transmission, giving orders and interception, was described formally. The established model which has the hierarchical structure takes into account the cooperation among elements and represents the concurrency and distributed character of the air defense operation. By doing performance index choosing and steady state analysis, it obtains the influences of different factors on the performance of air defense of warship formation. The appropriate composition of the basic formation elements in air defense operation is also obtained. Therefore, it provides a new method to deal with the air defense problem of warship formation.

**Key words:** performance evaluation process algebra; warship formation; air defense operation; modeling and analysis

大型水面舰艇编队在现代战争中的作用越发凸显,编队中各要素紧密配合,使其展现出出色的立体作战能力。防空作战作为舰艇编队的基本作战类型,关乎到舰艇编队自身生存,是贯穿海上作战的重要环节。

舰艇编队防空问题是海上舰艇作战研究的一个重要内容<sup>[1]</sup>,大量参考文献对其中的一些关键问题进行了相应的研究。有针对舰艇编队防空作战过程的某一环节的研究,如防空作战中预警任务<sup>[2]</sup>、通信过程<sup>[3]</sup>,目标分配<sup>[4-5]</sup>等,针对性强,但视角局限缺乏对作战完整过程的宏观把握,忽略了要素间的内在联系,特别是对于目标分配问题的研究,提出了大量的模型和算法,大多都忽视了与预警、通信等要素的协作关系;有对舰艇编队执行防空任务时阵位、兵力配置的研究,从不同角度讨论了编队要素的空间部署,但缺少对编队具

体作战过程的全部重现;有对舰艇编队防空作战整体过程的模型设计<sup>[6]</sup>,形式化描述了防空过程,但缺乏对模型的定量分析。对于舰艇编队防空作战整体过程定性定量相结合的研究还较少。面对日益严峻的空中目标威胁,在宏观角度下,为舰艇编队防空作战整体过程建立模型,分析各要素相互协作下模型性能具有重要意义。

性能评价过程代数(Performance Evaluation Process Algebra, PEPA)由其合并性、形式化、抽象化的特点,越来越受到关注,在并发、分布、动态系统建模和性能评价方面得到很好应用。它可以通过组件拆分复杂系统完成对系统的抽象,通过活动描述系统间、组件间的交互合作,结合系统的派生图进行定性分析,通过求得稳定状态概率获取性能评价参数进行定量分析。

\* 收稿日期:2013-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91024006,71031007)

作者简介:黄金才(1973—),男,安徽界首人,研究员,博士, E-mail:huangjincai@gmail.com

## 1 PEPA 方法

PEPA 方法在 1994 年首次由爱丁堡大学 Jane Hillston 提出,并在文献[7]中对其进行了详尽的阐述。PEPA 是一种高级建模语言,是对经典过程代数在时间和概率的扩展<sup>[7]</sup>:为系统中的每个活动增加了服从指数分布的时间延迟,通过活动的竞争选择来实现概率的扩展<sup>[7]</sup>。PEPA 已很好地应用于分布式计算机及通信系统的性能评价,有效缓解状态空间爆炸的问题。随着研究的完善和深入,应用范围得到了极大的扩展,如工业生产流程设计<sup>[8]</sup>、游戏软件设计<sup>[9]</sup>和生物学领域<sup>[10]</sup>等。

PEPA 建模的系统中,基本构成要素是组件(component)和活动(activity)。通过组件的活动及组件间的交互来描述系统。组件相当于系统可辨认的部分,是负责执行系统行为的子系统,用大写罗马字母开始命名,如  $P$ 。组件可以是原子的,也可以是由多个组件组成的复合体,能够执行一个或多个活动。活动用小写罗马字母表示,它由活动类型(action type)和活动速率(activity rate)组成。活动类型以小写希腊字母表示 PEPA 中某活动的持续时间以一个服从指数分布的随机变量来描述,这就是活动速率,取值可以是任意正实数,以字母表后部的罗马字母表示。用活动类型和活动速率可以表示活动,如  $(\alpha, r)$ 。

当组件执行某个活动  $a$  时,执行该活动  $a = (\alpha, r)$  的持续时间  $t$  的概率由分布函数  $F_a(t) = 1 - e^{-rt}$  来决定。经过  $t$  时间后,活动  $a$  将执行完毕,可以将  $r$  理解为单位时间完成该活动的次数。当组件  $a$  执行多个活动时,最先执行完的活动将被外部观察者看到,其他的活动将被取消。

PEPA 语法定义如下:

$$P := (\alpha, r). P \mid P + Q \mid P \parallel_L Q \mid P/L \mid C$$

各操作符含义如下:

1) 前缀(Prefix):  $(\alpha, r). P$

组件  $(\alpha, r). P$  表示该组件执行  $(\alpha, r)$  活动变成组件  $P$ 。活动持续的时间以变量  $r$  成指数分布,通过时间的占用来描述对资源的消耗。前缀是构成组件行为的基础方法,为组件指明了前置的活动。

2) 选择(choice):  $P + Q$

组件  $P + Q$  表示了系统将执行组件  $P$  或  $Q$  中的一个,提供了系统运行的不确定机制。选择操作符描述了组件间对于资源的竞争。当  $P$  和  $Q$  都能够执行同一活动时,哪一个组件先完成活动则选择执行哪一个组件,完成活动的执行时间与

他们的活动速率有关。同样,执行不同活动时,哪一个活动先执行完,则认为该执行该活动的组件首先被外部观察者观察到,其他活动活动将被抛弃。

3) 协作(cooperation):  $P \parallel_L Q$

组件  $P \parallel_L Q$  表示了组件  $P$  和  $Q$  将通过协作活动集  $L$  协同运行。当协作活动集为空时,则描述了组件  $P$  和  $Q$  平行运行,即  $P \parallel Q$ 。当协作活动集不为空时, $P$  和  $Q$  将共同执行协作活动集的活动。协作活动集的活动需是  $P$  和  $Q$  共有的,否则这样的协作是没有意义的,称之为死锁。与选择相比,组件虽然也各自占有的独立资源,但组件间进行协作时需要它们资源同时参与才能完成活动。

4) 隐藏(hiding):  $P/L$

组件  $P/L$  表示  $P$  将隐藏活动集  $L$  内的活动。隐藏操作符对系统不关心的活动进行了隐藏,减少了系统复杂度。

5) 常量(constant):  $C \triangleq P$

方程  $C \triangleq P$  表示将组件  $P$  赋值给常量  $C$ 。

在一般的系统过程建模中,前三种操作是最为常用的。在具体建模过程中,各个语义符间存在优先级。隐藏的优先级最高,其次是前缀,之后是协作,选择操作拥有最低的优先级。与四则运算类似,括号可以改变运算的优先级。

文献[7]通过简单的资源消耗型系统建模求解分析,很好地阐述了如何应用 PEPA 解决实际问题。其基本思路概括为:首先构建系统的 PEPA 模型,运用 PEPA 模型派生图生成系统的潜在随机模型,而由于活动持续时间被描述为服从指数分布的随机变量,则生成的随机模型是连续时间的马尔科夫过程。之后,求解连续时间的马尔科夫链稳定状态概率,从而基于该稳定状态构建回报函数对系统进行分析,如吞吐量、利用率等。

与常用的防空建模方法随机 Petri 网<sup>[11]</sup>相比,PEPA 方法通过组件的概念,分别构建系统中功能各异的部件,更好地体现了编队防空模型分布、并发的特征。与随机 Petri 网图形化描述方法相比,PEPA 方法通过形式化语言描述建模,采用的是自底向上的建模思想,考虑编队内部不同要素间的交互,建模过程中通过不同层级组件的协作,突出了舰艇编队防空作战模型的层次化结构,使这样的复杂系统更加容易解构。PEPA 接近自然语言,更加易读易懂,方便对模型进行定性分析;PEPA 建模方法对模型进行了简化和复合,进行定量分析时,能够有效地减少随机 Petri 网中较

难应对的状态空间爆炸的问题。考虑到 PEPA 在编队建模上的优势,本文将采取 PEPA 方法对大型水面舰艇编队防空过程进行建模和分析。

## 2 大型水面舰艇编队防空过程建模

### 2.1 大型水面舰艇编队防空三层结构

大型水面舰艇编队在执行防空任务时,拦截体系由战斗机、搭载防空导弹的舰艇和火炮密集阵组成,作战区域可分为远、中、近 3 层<sup>[12]</sup>,如图 1 所示。如美军大型水面舰艇编队,以航母为核心,在远程拦截层一般保持一架预警机执行预警任务和四架战斗机执行空中战斗巡逻和拦截任务;在中程拦截层,负责执行防空任务的为 2~3 艘配备“宙斯盾”的巡洋舰或驱逐舰;而近程拦截层由水面舰艇的火炮密集阵防御系统负责防空拦截。

#### 1) 远程拦截层

远程拦截层的防御范围为距离编队核心 185km~400km<sup>[12]</sup>的区域。该层防空作战任务主要由舰载战斗机承担,其可控制编队周围 1000km 范围内的空域,主要拦截目标是来袭飞机和巡航导弹。当发现来袭目标时,预警机将直接引导指挥在该区域的战斗机进行防空拦截。

#### 2) 中程拦截层

中程拦截层的防御范围为距编队核心 50km~185km<sup>[12]</sup>的区域。该层防空任务主要由编队水面舰艇承担。当远程拦截层被突破,水面舰艇将利用舰对空导弹对突防目标进行拦截。该层一般由舰载雷达负责空情预警,获取空情后传递预警信息给指挥中心,再由指挥中心分析处理后下达打击命令给舰艇。

#### 3) 近程拦截层

近程拦截层是拦截空中来袭目标的最后一道防线,设在距编队核心 50km<sup>[12]</sup>以内,该层运用密集阵防空武器进行拦截。与中层拦截层类似,首先由该层防空哨舰的对空警戒雷达和编队内各舰艇的警戒雷达进行空情预警,获取空情后传递给指挥中心,由指挥中心下达命令给舰艇导弹或火炮密集阵。

### 2.2 PEPA 过程建模

以上述大型水面舰艇编队防空 3 层结构为依据,为重现整个舰艇编队防空系统的运作机制和特征,在建模过程中重点关注编队防空作战基本要素及其相互协作,通过基本作战过程的构建,从宏观角度分析各要素在防空作战过程中对系统能力发挥的影响。

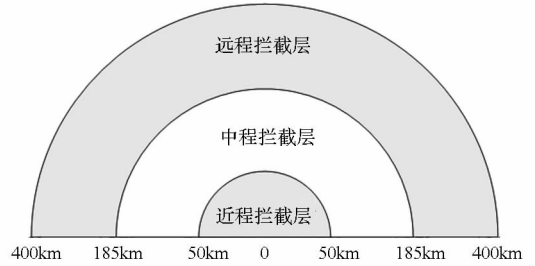


图 1 编队防空 3 层结构示意图

Fig. 1 Three-layer structure of air defense area for large surface warship formation

假设我大型水面舰艇编队受到敌方按一定速率的持续攻击,我方情报组件能力强大可以“发现且一直追踪”。在敌方持续的饱和攻击下,且不考虑编队的作战损耗,在某一时刻,分布在各层敌方攻击单元的数量我们认为是稳定的:敌方攻击单位突破远程拦截层防御到达中程拦截层的数量将占总量 30%,突破中层拦截层防御到达近程拦截层的数量占总量 20% 的数量,处在远程拦截层的攻击单位数量占总量的 50%。

设  $z$  为每秒敌方攻击我舰艇编队的总次数,若敌方一次只发射一个进攻武器,则  $z$  为敌方单位时间攻击我舰艇编队的进攻武器总量。在远程拦截层,预警机 (AEW) 不断以活动速率  $s_1$  进行侦查 (search),根据假设  $s_1 = 0.5z$ ,预警机发现目标即以活动速率  $t$  传递信息 (transfer) 给以活动速率  $pa$  巡逻 (patrol) 的战斗机 (Battleplane),战斗机接收 (transfer) 到信息后 (这里接收速率由预警单元传递消息的活动速率决定,把这种活动速率称为被动活动速率 passive rate,在建模中用  $T$  来表示),随即进行成功的拦截 (attack) 或失败的拦截 (fattack),成功拦截的概率认为是一定的  $p$ 。这里需要注意的是,活动成功拦截 (attack) 和失败拦截 (fattack) 相当于是对于组件进行“攻击”活动资源  $d1$  争夺。

$$AEW \triangleq (\text{search}, s_1). AEW1;$$

$$AEW1 \triangleq (\text{transfer}, t). AEW;$$

$$\text{Battleplane} \triangleq (\text{patrol}, pa). \text{Battleplane} \\ + (\text{transfer}, T). \text{Battleplane1};$$

$$\text{Battleplane1} \triangleq (\text{attack}, p * d1). \text{Battleplane} \\ + (\text{fattack}, (1 - p) * d1). \text{Battleplane};$$

在中程拦截层,舰载预警单元 (SPA) 不断以活动速率  $s_2$  进行侦查 (search),根据假设  $s_2 = 0.3z$ ,发现目标即以活动速率  $t$  传递消息 (transfer) 给防空指挥所 (Commander),防空指挥所接收 (transfer) 信息后,以活动速率  $e$  进行分析 (estimate),然后以活动速率  $o$  下达 (order) 指令。

舰船 (Warship) 接收指令 (order), 这里接收指令的活动速率是被动的, 然后舰船开展成功的拦截 (attack) 或者失败的拦截 (fattack), 与上层类似, 成功拦截的概率一定为  $q$ 。

$SPY \triangleq (search, s_2). SPY1;$   
 $SPY1 \triangleq (transfer, t). SPY;$   
 $Commander \triangleq (transfer, T). Commander1;$   
 $Commander1 \triangleq (estimate, e). Commander2;$   
 $Commander2 \triangleq (order, o). Commander;$   
 $Warship \triangleq (order, T). Warship1;$   
 $Warship1 \triangleq (attack, q * d2). Warship$   
 $+ (fattack, (1 - q) * d2). Warship;$

近程拦截层的运作与中层类似。预警单元 (Radar) 不断以活动速率  $s_3$  进行侦查 (search), 根据假设  $s_3 = 0.2z$ , 发现目标则以活动速率  $t$  传递消息 (transfer) 给防空指挥所 (Commander), 防空指挥所接收 (transfer) 信息后, 以活动速率  $e$  进行分析 (estimate), 然后以活动速率  $o$  下达 (order) 指令。火炮密集阵 (Shortrange) 接收指令 (order), 进行成功的拦截 (attack) 或者失败的拦截 (fattack), 成功拦截的概率一定为  $m$ 。注意, 中层拦截层与近程拦截层由同一防空指挥所指挥, 这里就不再重复指挥所的建模。

$Radar \triangleq (search, s_3). Radar1;$   
 $Radar1 \triangleq (transfer, t). Radar;$   
 $Shortrange \triangleq (order, T). Shortrange1;$   
 $Shortrange1 \triangleq (attack, m * d3). Shortrange$   
 $+ (fattack, (1 - m) * d3). Shortrange;$

整个舰艇编队防空系统是由 3 层拦截协同完成的, 3 层内部也存在协同。

远程拦截层, 预警机组件 (AEW) 与  $i$  个战斗机 (Battleplane) 组件协同, 协作活动集为  $\langle transfer \rangle$  :

$C1 \triangleq AEW \langle transfer \rangle Battleplane [i];$

中程拦截层, 舰载预警单元组件 (SPY) 与防空指挥所 (Commander) 协作, 协作活动集为  $\langle transfer \rangle$ , 防空指挥所与  $j$  个舰艇组件 (Warship) 协同, 协作活动集为  $\langle order \rangle$  :

$C2 \triangleq SPY \langle transfer \rangle Commander$   
 $\langle order \rangle Warship [j];$

近程拦截层, 近程预警组件 (Radar) 与防空指挥所 (Commander) 协作, 协作活动集为  $\langle transfer \rangle$ , 防空指挥所与  $k$  个火炮密集阵组件 (Shortrange) 协同, 协作活动集为  $\langle order \rangle$  :

$C3 \triangleq Radar \langle transfer \rangle Commander$   
 $\langle order \rangle Shortrange [k];$

远、中、近 3 层在整个系统中是平行关系, 整个系统的 PEPA 模型如下:

$Team\_system \triangleq C1 \parallel C2 \parallel C3;$

设敌方发射一次进攻武器的期望时间为 0.5s, 预警机组件、舰载预警组件、近程预警组件传递一次信息的期望时间为 5s, 指挥所处理分析一次的期望时间为 5s, 下达一次命令的期望时间为 5s, 战斗机进行一次巡逻的期望时间为 50s, 进行一次攻击活动的期望时间为 5s, 进行成功拦截活动的概率为 0.6, 舰艇进行一次攻击活动的期望时间为 10s, 进行拦截成功活动的概率为 0.7, 火炮密集阵进行一次攻击活动的期望时间为 3s, 进行成功拦截活动的概率为 0.8。以 60s 为计量单位, 则可以得到各个活动每分钟执行次数, 即活动速率, 如表 1 所示。

表 1 模型参数取值  
 Tab. 1 Parameter values

参数	取值
$z$	120
$t$	12
$e$	12
$o$	12
$pa$	1.2
$d1$	12
$p$	0.6
$d2$	6
$q$	0.7
$d3$	20
$m$	0.8

在此便完成了基于 PEPA 的大型水面舰艇编队防空作战过程建模, 完整展现了整个防空过程。

建立的 PEPA 模型通过组件构建, 体现了系统分布、并发的特征。通过组件交互, 关注系统内部的活动, 突出了防空要素间的相互协作, 模型层次结构明显。且 PEPA 语言接近自然语言, 方便阅读理解。通过建立的 PEPA 模型, 结合其派生图进行定性分析<sup>[7]</sup>, 可以获得具体作战流程和信息流转过程。

### 3 基于系统稳定状态求解与分析

#### 3.1 稳定状态概率分布求解

PEPA 方法的核心思想是将 PEPA 模型转化为连续时间马尔科夫过程, 基于系统活动稳定状态求解稳定状态概率分布。

PEPA 模型派生图中, 组件或组件派生作为该派生图的状态节点, 相对应组件间可能的转移

通过活动来实现,用弧来表示,弧上标记活动类型和活动速率。基于转换关系的派生图,描述了 PEPA 模型的所有可能演化。例如,当战斗机组件数  $i = 1$  时,  $C_1$  的派生图如图 2 所示。

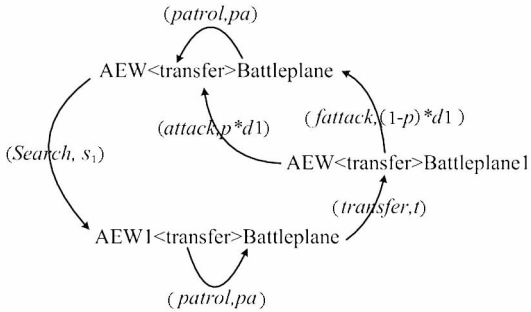


图 2 远程拦截层 PEPA 模型  $C_1$  派生图

Fig. 2 Derivation graph for  $C_1$ 's PEPA model

派生图描述的随机过程由于活动持续时间服从指数分布,根据指数分布的无记忆特征,组件执行某活动由一个状态到达另一个状态所需时间与当前状态有关,满足无后效性,则该随机过程为马

尔科夫过程。PEPA 模型的一定派生图是强连接的,则该马尔科夫过程是遍历的,能够进行稳定状态的分析。在文献[6]中,对上述进行了证明。根据任意、有限的 PEPA 模型,其派生图对应的连续时间马尔科夫链的转移速率矩阵  $Q$ ,存在稳定状态分布  $\pi(\cdot)$  满足:

$$\pi Q = 0; \sum_{l=1}^n \pi_l = 1 \quad (1)$$

其中  $l = 1, 2, 3, \dots, n, \pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ 。线性方程的矢量解就是系统的稳定状态矢量矩阵<sup>[13]</sup>。

运用实验工具 PEPA-Eclipse<sup>[14]</sup> 进行稳定状态分析,当战斗机组件数  $i$ , 舰艇组件数  $j$ , 火炮密集阵组件数  $k$  的值均为 1 时,可求得上文舰艇编队防空作战 PEPA 模型的各个稳定状态及其对应的稳定状态概率,共有 576 个。表 2 为其中前 9 个稳定状态及稳定状态概率,表中每行依次为系统稳定状态编号、在该稳定状态下各组件状态以及系统在该稳定状态下的概率。

表 2 模型前 9 个稳定状态及概率

Tab. 2 The first 9 steady states and their steady-state probabilities

序号	稳定状态									稳定状态概率
1	AEW	Battleplane	SPY	Commander	Warship	Radar	Commander	Shortrange		9. 78429E - 9
2	AEW1	Battleplane	SPY	Commander	Warship	Radar	Commander	Shortrange		2. 935282E - 7
3	AEW	Battleplane	SPY1	Commander	Warship	Radar	Commander	Shortrange		3. 845226E - 6
4	AEW	Battleplane	SPY	Commander	Warship	Radar1	Commander	Shortrange		4. 656916E - 7
5	AEW	Battleplane1	SPY	Commander	Warship	Radar	Commander	Shortrange		4. 892145E - 8
6	AEW1	Battleplane	SPY1	Commander	Warship	Radar	Commander	Shortrange		1. 153567E - 4
7	AEW1	Battleplane	SPY	Commander	Warship	Radar1	Commander	Shortrange		1. 397075E - 5
8	AEW	Battleplane	SPY	Commander1	Warship	Radar	Commander	Shortrange		1. 371198E - 6
9	AEW	Battleplane	SPY1	Commander	Warship	Radar1	Commander	Shortrange		1. 830168E - 4

通过派生图以及连续时间马尔科夫过程稳定概率的求解,对系统组件的状态、活动迁移的过程有了定性的认识,求出的稳定状态概率的分布是后续开展分析的基础。

### 3.2 性能指标选择与稳定状态分析

PEPA 模型的性能指标是由基于稳定状态概率分布的回报函数得到的。我们可以根据系统中特定的活动联系回报,来定义感兴趣的指标。设系统中某活动  $a$  发生在组件(状态)  $C_l$  下,其所关联的回报是  $\rho_l, l = 1, 2, 3, \dots, n$ , 系统稳定状态分布为  $\pi(\cdot)$ , 则  $a$  的总回报  $R$  为<sup>[13]</sup>:

$$R = \sum \rho_l \pi(C_l) \quad (2)$$

在舰艇编队防空过程中,关注的是整个系统成功拦截的能力,即系统单位时间内完成成功拦

截(attack)活动的次数,attack 活动的吞吐量,我们将其作为刻画系统能力的指标。而活动速率描述的就是活动在相关状态的回报,由式(2)通过 attack 活动在各稳定状态下概率与对应活动速率乘积的总和求得总回报,即上述吞吐量。当上述战斗机组件数、舰艇组件数及火炮密集阵组件数都为 1 时,可求得模型 attack 活动的吞吐量越为 7.69,即该舰艇编队防空模型每分钟成功拦截的次数为 7.69 次。

为了从宏观上分析大型舰艇编队执行防空任务时不同因素对系统能力发挥的影响,本文主要从确定合理的编队组成配置和编队要素能力进行研究。

#### 3.2.1 编队组成配置对系统能力的影响

分别探究远程拦截层配置战斗机数量  $i$ 、中层

拦截层配置防空舰艇数量  $j$ 、近程拦截层配置火炮密集阵单元数量  $k$  的改变对系统能力的影响,而进行了实验。图3,图4,图5分别为固定参数  $j, k$  的值为1改变参数  $i$ ;固定参数  $i, k$  的值为1改变参数  $j$ ;固定参数  $i, j$  的值为1改变参数  $k$  时系统拦截能力的变化情况。

由图3、图4和图5可以发现,上文所述系统成功拦截的能力,即系统 attack 活动的吞吐量,并不是随着编队要素数量增加而一直增加的,最后是呈现饱和的。由图3,保持舰艇数量和火炮密集阵数量不变,战斗机数量增大到5时,系统成功拦截能力达到最大;由图4,保持战斗机数量和火炮密集阵数量不变,防空舰艇数量增大到3时,系统成功拦截能力达到最大;由图5,保持战斗机数量和舰艇数量不变,火炮密集阵单元数量增大到2时,系统成功能力达到最大。由此,可以得到系统成功拦截能力发挥最大时,编队中各个要素的组成情况:远层拦截层配置战斗机5架,执行巡逻任务并时刻准备打击来袭目标,中层拦截层配置3艘防空舰艇执行防空任务,近层拦截层配置2个单元的火炮密集阵。

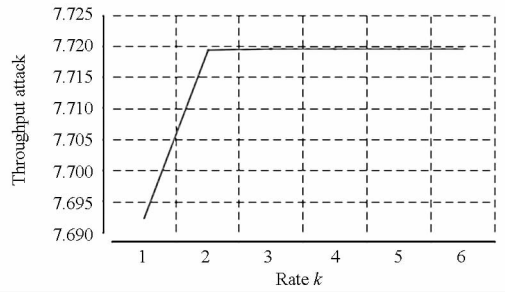


图5 近程拦截层火炮密集阵数量对系统拦截能力的影响  
Fig. 5 The interception capacity of system against the number of shorrange components

拦截能力有着不小影响。本文对于上述能力是利用活动速率来描述的:要素间信息传递能力即单位时间内传递信息的次数  $t$ ,指挥所处理分析能力即单位时间内分析处理信息的次数  $e$ ,依次类推,战斗机、舰艇、火炮密集阵要素攻击能力分别以  $d1、d2、d3$  来刻画,攻击能力对系统的影响是类似的,仅选  $d1$  来说明问题。实验时为了简化运算,定义战斗机、防空舰艇和火炮密集阵单元的数量都为1,图6~8分别保持其他参数不变,依次改变  $t、e、d1$  值。

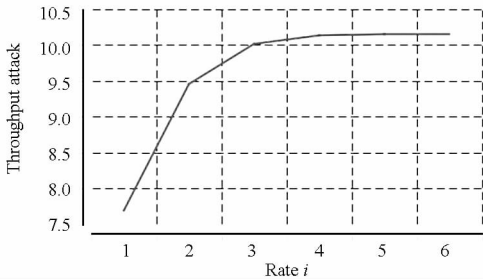


图3 远程拦截层战斗机数量对系统拦截能力的影响  
Fig. 3 The interception ability of system against the number of battleplane components

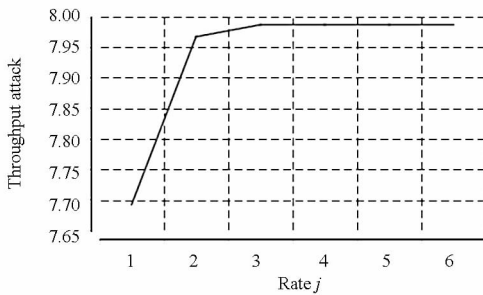


图4 中程拦截层防空舰艇数量对系统拦截能力的影响  
Fig. 4 The interception capacity of system against the number of warship components

### 3.2.2 编队要素能力对系统能力的影响

除各要素数量对整个编队防空系统有着显著影响外,要素间信息传递能力、防空指挥所分析处理能力、攻击要素的攻击能力也对整个系统成功

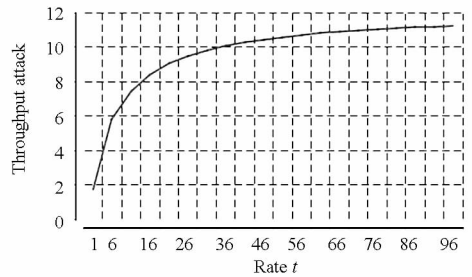


图6 通信能力对系统拦截能力的影响  
Fig. 6 The interception capacity of system against transfer rate ( $t$ )

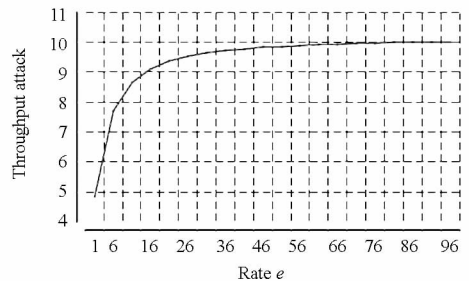


图7 防空指挥所分析处理能力对拦截能力的影响  
Fig. 7 The interception capacity of system against estimate rate ( $e$ )

由图6可知,系统成功拦截能力随着通信能力的增强(每分钟传递信息的次数)而增强,但系统拦截能力增强的速度是逐渐下降的。由图7、图8可以得到类似结论,系统成功拦截能力随着防空指挥所处理能力或攻击单元攻击能力增强的

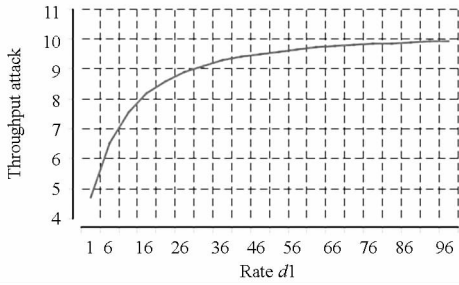


图 8 战斗机攻击能力对拦截能力的影响

Fig. 8 The interception capacity of system against rate  $d_1$ 

速度逐渐减慢的。这为我们提供了一个事实:单靠提升通信能力、指挥所信息处理能力或攻击单元攻击能力,系统能力的增强是受到局限的。因此,不考虑要素能力的相互制约,盲目提升某一要素能力,花费大量人力物力时间,但收效甚微,比如仅仅将信息传递能力由每分钟 50 次提升到每分钟 100 次,可能花费了数年研究时间以及许多科研经费,但对于系统拦截能力提升的贡献只有大约每分钟 1 次,这样显然是不可取的。

通过上述定量的分析,得知编队防空成功拦截能力并不是随着编队要素数量的增加而无限增加的,是存在一个最大值的,由此可获得合理的编队组成;编队防空成功拦截能力可随着某一要素能力的增强而增强,由于其他要素能力的制约,增强速度逐渐减慢。

## 4 结论

本文运用 PEPA 方法,以大型舰艇编队防空 3 层结构为基础,对防空作战全过程进行了有效建模。建立的模型注重编队内部要素间相互协作,模型层次化结构特征和分布并行特点突出。通过形式化的定性分析体现了作战流程和信息流转;通过定量分析,得到了大型舰艇编队防空作战过程中,随着各要素数量的增加,系统性能的增加是呈现饱和的,从而获得了使防空作战能力发挥至最大的编队要素组成。由于受到其他要素能力的限制,提升某要素能力,系统能力的增加速度是逐渐减慢的。分析结果表明,PEPA 是研究编队防空问题的可行方法,同时这是 PEPA 实际应用的全新扩展。在后续研究中希望进一步对模型进行完善,加入软杀伤等对编队的影响。

## 参考文献 (References)

[1] 李登峰,许腾. 海军作战运筹分析及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007.  
LI Denghui, XU Teng. Naval operational research analysis and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

[2] 王国师,李强,代科学,等. 基于防空警戒任务的多预警机协同补盲[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(5):941-946.  
WANG Guoshi, LI Qiang, DAI Kexue, et al. Blind compensation for multi-AWACS cooperation based on aerial defense and warning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 941-946. (in Chinese)

[3] 刘开弟,庞彦军,郝继梅. 基于信息融合技术的防空通信系统效能评估[J]. 火力与指挥控制,2010,35(5):5-9.  
LIU Kaidi, PANG Yanjun, HAO Jimei. Effectiveness evaluation of the air defense communication system based on information fusion technology [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(5): 5-9. (in Chinese)

[4] 罗江锋,朱承,崔婧,等. 舰艇防空火力规划与调度方法研究[J]. 国防科技大学学报,2013,35(2):40-45.  
LUO Jiangfeng, ZHU Cheng, CUI Jin, et al. Planning and scheduling for the air defense of warship [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 40-45. (in Chinese)

[5] 董奎义,杨根源,李京. 舰艇编队防空最优火力分配问题的蚁群算法[J]. 火力与指挥控制,2011,36(11):132-136.  
DONG Kuiyi, YANG Genyuan, LI Jing. Research on ant colony algorithm for solving optimal firepower assignment problem of ships formation air defense [J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(11): 132-136. (in Chinese)

[6] 王军,赵晓哲,张瑛涵,等. 舰艇编队协同防空体系免疫多智能体模型[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(12):2431-2438.  
WANG Jun, ZHAO Xiaozhe, ZHANG Yinhan, et al. Immune multi-agent model for cooperation air-defense system of system for surface warship formation [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(12): 2431-2438. (in Chinese)

[7] Hillston J. A Compositional approach to performance modeling[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 1994.

[8] Holiton D R W. A PEPA specification of an industrial production cell[J]. The Computer Journal, 1995, 38(7): 542-551.

[9] Gilmore S, Kloul L, Piazza D. Modeling role-playing games using PEPA net[J]. Computer and Information Science-ISCIS, 2004, 3280: 523-532.

[10] Hillston J, Ciocchetta F. Bio-PEPA: A framework for modelling and analysis of biological system[J]. Theoretical Computer Science, 2009, 410(33-34): 3065-3084.

[11] 董奎义,杨根源,王子明. 基于GSPN的编队网络化防空指挥流程研究[J]. 现代防御技术,2011,39(4):45-49.  
DONG Kuiyi, YANG Genyuan, WANG Ziming. Research on formation network centric air defense command chain based on generalized stochastic petri net [J]. Modern Defense Technology, 2011, 39(4): 45-49. (in Chinese)

[12] 张冬兴,缪旭东. 美航母编队防空作战能力分析[J]. 飞弹导航,2010,(8):60-65.  
ZHANG Dongxing, MIU Xudong. Analysis of the air defense capability of the US warship formation [J]. Winged Missiles Journal, 2010, (8): 60-65. (in Chinese)

[13] 林闯,魏丫丫. 随机进程代数与随机 Petri 网[J]. 软件学报,2002,13(2):203-213.  
LIN Chuang, WEI Yaya. Stochastic process algebra and stochastic Petri net [J]. Journal of Software, 2002, 13(2): 203-213. (in Chinese)

[14] Tribastone M, Duguid A, Gilmore S. The PEPA eclipse plugin project [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2009, 36(4): 28-33.