

引用格式:张本辉,门金柱,姚科明,等.舰载直升机反潜作战使用研究综述[J].电光与控制,2019,26(8):60-66,89. ZHANG B H, MEN J Z, YAO K M, et al. Review of research on shipboard helicopter in antisubmarine operational application[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):60-66, 89.

## 舰载直升机反潜作战使用研究综述

张本辉, 门金柱, 姚科明, 孙心丰, 王建国  
(海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 针对舰载直升机的反潜作战使用问题,从反潜战术层面综述了舰载直升机对潜搜索、跟踪、攻击作战的国内研究现状,分析了当前反潜作战使用研究方面存在的不足,并对下一步工作的研究重点进行了展望。

**关键词:** 舰载直升机; 反潜; 作战使用; 综述

**中图分类号:** E273.3      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.012

## Review of Research on Shipboard Helicopter in Antisubmarine Operational Application

ZHANG Ben-hui, MEN Jin-zhu, YAO Ke-ming, SUN Xin-feng, WANG Jian-guo  
(Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of shipboard helicopter in antisubmarine operational application, this paper summarizes the domestic research status of antisubmarine operational applications of shipboard helicopters, including submarine searching, tracking and attacking, from the aspect of antisubmarine tactics. The shortcomings of current researches on antisubmarine operational application are analyzed, and key items of research in the future are also given.

**Key words:** shipboard helicopter; antisubmarine; operational application; review

### 0 引言

20世纪两次世界大战经验表明,潜艇是海上军事斗争中极具威胁的攻击兵力。如何与潜艇作斗争,在作战中取得更大主动,一直是全世界海军公认的难题。与水面舰艇和潜艇反潜相比,航空反潜具有速度快、反应迅速及搜索效率高、隐蔽安全等非对称的优势;其中,舰载直升机具有垂直起降、空中悬停和快速改变飞行姿态等特点,使其在反潜战中的地位日益突出。世界上约40个国家的海(空)军装备有大约20种30个型号1900余架反潜直升机,占反潜机总数的52.2%<sup>[1]</sup>。据有关资料介绍,舰载直升机反潜战术训练占飞行训练总内容的40%<sup>[2]</sup>,可见舰载直升机部队对反潜作战的重视。

目前,舰载直升机反潜作战使用是国内外研究热点问题之一,研究内容主要体现在两个方面:一是反潜装备,对舰载直升机平台本身及其搭载的搜、攻潜装备的技、战性能进行研究,不断提高其反潜作战能力,为

其遂行反潜任务提供有力的支撑;二是反潜战术,结合具体的搜、攻潜装备,对舰载直升机的战术使用进行研究,基于搜索论、协同论等多学科理论,提出作战实施的具体方法和原则<sup>[3]</sup>。

按照作战流程,一个完整的反潜作战过程可以划分为搜索(探测、识别、定位)、跟踪和攻击3个阶段。因此,本文按照对潜搜索、对潜跟踪和对潜攻击3个部分对舰载直升机作战使用的研究现状进行分析。

### 1 舰载直升机对潜搜索研究现状分析

对潜搜索是实施反潜作战的第一步,也是关键的一步。由于海洋环境复杂多变,潜艇具有非常强的隐蔽性,给反潜作战带来很大难度。可以说,在反潜作战过程中,90%以上的时间均在搜索、探测潜艇。对潜搜索的研究主要分为两个部分:1)在理论上进行搜索算法研究,为优化搜潜方案提供理论支撑;2)在实践上以搜索理论为基础,进行航空兵机动观察的战术行动研究,提高搜潜效率<sup>[4]</sup>。

#### 1.1 舰载直升机搜潜理论的研究现状

第二次世界大战期间,为满足军事上有效使用飞机和水面舰艇搜索敌潜艇的急切需求,产生了搜索论

收稿日期:2018-09-20      修回日期:2018-10-10

基金项目:“十三五”装备预研项目(6140207010201)

作者简介:张本辉(1988—),男,河南南阳人,博士,讲师,研究方向为航空反潜。

这门学科,由此奠定了对潜搜索的理论基础,其目的是以最大可能或最短时间找到指定目标。搜索论经历了3个主要发展阶段:20世纪50年代 KOOPMAN 创立了搜索论,20世纪70年代 STONE 发展与完善了搜索论,这两个阶段解决了对静止目标的搜索问题;20世纪70年代中期至80年代中期,在军事需求实用化的推动下,搜索论进入了对机动目标搜索算法的研究阶段。20世纪80年代,搜索论已在理论与方法上达到相当完善的程度。

国内对最优搜索理论的研究相对较少,主要集中在搜索算法方面。文献[5]是国内第一本搜索论专著,主要是对 KOOPMAN 的《运筹学方法》和 STONE 的《最优搜索论》相关内容的综合;文献[6]分析了航空反潜作战中指挥员的决策过程,基于层次分析法(AHP)的可变因素模糊集向量,建立了搜索行动方案优选模型;文献[7]研究了离散时空目标的最优化搜索技术,具体分析了离散目标分布函数已知时的最优搜索策略和离散目标概率分布函数未知时的搜索概率估计及误差分析,为优化搜潜算法指明了方向。

## 1.2 舰载直升机搜潜装备作战使用研究现状

舰载直升机的搜潜装备主要分为声学探测和非声学探测两大类:声学探测设备主要有吊放声呐和声呐浮标;非声学探测设备主要有磁探仪、机载雷达、目视探测仪、红外探测仪、激光探测仪、废气探测仪和核辐射探测仪等<sup>[8]</sup>。

### 1.2.1 吊放声呐的作战使用研究现状

吊放声呐是舰载直升机执行反潜作战任务的主传感器,具有工作距离远、测量精度高、可独立完成搜索、跟踪和攻击任务、主/被动工作方式、可以多次使用等优点,其作战使用研究主要体现在以下4个方面。

#### 1) 吊放声呐探测距离及搜索效能研究。

文献[9]根据吊放声呐工作原理及性能参数,考虑了海洋环境和目标特性对声呐探测距离的影响,建立了探测计算模型;文献[10-11]借助声场计算软件(Kraken, Bellhop)分析了声速剖面对吊放声呐作用距离的影响,并求取了最佳探测深度;文献[12-13]基于不同战术背景,建立了采用不同吊放声呐搜索样式时的搜潜概率模型,分析了潜艇规避、搜索样式以及吊放声呐间隔系数等因素对探测概率的影响;文献[14]建立了单架舰载直升机使用吊放声呐搜索时的巡逻线长度模型。

#### 2) 吊放声呐对潜搜索的航路规划研究。

文献[15]建立了直升机运用吊放声呐在两个定测点间运动转移的数学模型,得到了与实际基本相符的作战仿真效果;文献[16]分析了风对舰载直升机吊

放声呐探测过程的影响,建立了扩展螺旋线形应召搜潜模型;文献[17]基于舰载直升机悬停探测飞行过程、最短飞行路径准则和几何原理,规划舰载直升机悬停探测飞行路径,并考虑了风对舰载直升机飞行状态的影响;文献[18-19]基于遗传算法对吊放声呐的搜潜路径进行优化;文献[20]基于先验目标航向,建立了一种新的吊放声呐扇面螺旋线形应召搜潜模型。

#### 3) 舰-机以及机-机协同对潜搜索研究。

文献[21]针对应召反潜中敌潜艇直线形规避行为,提出了双机协同反潜的预测搜索法;文献[22]将螺旋形搜索模型应用于吊放声呐应召搜潜,由单机搜索推广到双机搜索;文献[23]建立了舰载直升机4机编队吊放声呐的扩展方形、扩展圆形、扩展螺旋形应召搜索模型;文献[24]提出了对称扩展方形搜潜法,采用解析法建立了搜潜概率计算模型;文献[25]给出了舰载直升机联合使用声呐浮标与吊放声呐的搜潜策略,并建立了两机协同反潜定量分析模型;文献[26]提出了基于吊放声呐与舰壳声呐、吊放声呐与拖曳线列阵声呐相融合的舰-机协同对潜搜索方法;文献[27]建立了舰载声呐与吊放声呐构成的异类传感器双基地搜索模型。

#### 4) 直升机对水面舰艇编队的对潜警戒研究。

文献[28]给出了舰艇编队警戒范围的数学模型,建立了单、双机联合舰艇编队反潜警戒模型;文献[29]建立了驱护舰编队外层防御搜索区舰载直升机发现潜艇的概率模型;文献[30]研究了基于模糊层次分析法的舰机协同搜索方案优化问题;文献[31]建立了区分前置法和侧翼法的舰载直升机伴随护航反潜的同步模型;文献[32]建立了舰载直升机在航母近程对潜防御区的警戒能力计算模型;文献[33]研究了舰机时间协同检查搜索样式;文献[34]针对侧翼、前方反潜护航的实际需要,提出了倾斜三角形、“弓”字形和蛇形机动的护航搜索模型;文献[35]构建了舰载直升机防敌潜艇突破登陆编队对潜警戒幕的数学模型;文献[36]针对水面舰艇编队尾后方向的潜艇威胁,建立了多机舰艇编队尾后搜潜的警戒扇面定量计算模型。

### 1.2.2 声呐浮标的作战使用研究现状

声呐浮标具有搜索效率高、直升机机动方便、隐蔽性好、操纵简单等优点,其作战使用的研究主要体现在以下4个方面。

#### 1) 声呐浮标作用距离研究。

文献[37]分析了声呐浮标作用距离随海洋噪声的变化情况;文献[38]利用浅海平滑平均声场理论推导了潜艇深度变化后主动声呐浮标的作用距离;文献[39]在特定的海洋环境、检测概率和虚警概率条件下,估算

了主/被动声呐浮标的作用距离;文献[40]分析了瞬时探测概率以及累积探测概率与仿真参数之间的关系,为达到最佳作战效能的浮标布放优化问题提供理论依据;文献[41]针对不同的海洋环境进行仿真实验,预测了主动声呐浮标在不同水平距离和深度的传播损失及检测概率。

#### 2) 声呐浮标阵的定位精度研究。

文献[42]利用线性最小二乘算法解决了声呐浮标的自动定位计算问题;文献[43]介绍了基于接收声强的被动全向声呐浮标距离比定位方法的原理及其解析计算方法,给出了相当完善的公式推导;文献[44]分析了加权融合和非线性最小二乘数据融合在浮标定位中的应用;文献[45-47]分析了基于 LOFIX, HYFIX 以及最小平方算法的声呐浮标阵定位的精度问题。

#### 3) 声呐浮标阵的搜潜效能及阵形优化方法研究。

文献[48-49]以舰载直升机执行不同的反潜任务为战术背景,建立了搜潜过程中潜艇运动模型和浮标布阵数学模型,分析了潜艇分布规律、潜艇机动、不同搜索阵形、浮标间隔等因素对声呐浮标阵搜索效能的影响;文献[50]研究了监听时间对声呐浮标阵搜索效能的影响;文献[51-52]利用遗传算法、分区分支界定算法等对声呐浮标阵的布放模型进行优化,使其在相同的条件下具有更高的搜索概率。

#### 4) 声呐浮标与吊放声呐的联合探测研究。

文献[53]建立了双基地航空声呐搜潜距离误差模型和误差系数模型;文献[54]建立了单机吊放声呐和浮标的主/被动联合多基地搜潜模型;文献[55]分析了双基地声呐的信号余量,给出了区域跟踪概率的概念和计算方法;文献[56]研究了吊放声呐与声呐浮标在应召搜潜中的联合运用问题;文献[57]建立了单机吊放声呐和浮标的主/被动联合多基地搜潜模型;文献[58]建立了舰载直升机吊放声呐及声呐浮标阵列的协同搜索模型。

### 1.2.3 非声探测器材的作战使用研究现状

文献[59]介绍了航空反潜非声探测设备的基本概念、分类和各类探测设备的作战应用,并对其装备现状和发展趋势作了阐述;文献[60]结合不同的潜艇空间磁场模型,对舰载直升机磁异探测原理进行了建模仿真;文献[61-62]分析了潜艇航向、潜艇航速、目标分布特点对磁探仪探测宽度以及搜索概率的影响;文献[63]对机载激光反潜探雷系统的发展现状进行了分析;文献[64]针对红外探索仪系统反潜探测问题,介绍了红外探索仪系统反潜探测的应用原理和工作方式,并建立了相应的数学模型;文献[65]介绍了航空反潜过程中目力搜索的各种搜潜方式以及对潜艇的

发现概率和影响因素,找出了针对不同海域进行目力搜索的最佳搜索方式。

## 1.3 舰载直升机对潜搜索研究存在的不足

### 1.3.1 考虑海洋环境影响不够

舰载直升机无论选择何种探测设备,都应该充分考虑海洋环境的影响。就目前的文献来看,考虑海洋环境对搜潜的影响还远远不够,主要体现在以下3个方面:1)对于搜潜设备的战术作用距离估算过于简单,大多数模型仅考虑了声速剖面或者海洋环境噪声的影响,基于简单的经验公式或者声学软件来计算传播损失;2)大部分文献都将直升机飞行转移分解为一系列折线段,实际上直升机的飞行轨迹要考虑风速的影响;3)海洋环境(云雨雾、风浪等)对非声探测器材的探测效果也会产生影响。

### 1.3.2 潜艇规避模型过于简单

就目前的文献来看,潜艇规避模型普遍过于简单,主要体现在以下2个方面:1)潜艇规避航空声呐时,可能采取变速、变深、变向等手段,大部分模型考虑的手段比较单一,另外,潜艇的规避必然会对声呐的探测距离产生影响,这也是很多文献中没有考虑的;2)在潜艇规避航空声呐探测时,几乎所有的模型都没有考虑水声对抗设备(声诱饵或者声干扰器)对探测结果的影响。

### 1.3.3 机-机协同和舰-机协同对潜搜索的研究不够

在目前技术条件下,舰载直升机由于其自身平台的缺陷,单机搜潜的留空时间和载重能力是非常有限的,在大多数战术背景下,单机基本上不太可能完成搜潜任务,因此,就需要与其他直升机或者其他兵力配合进行协同反潜,这方面的研究做得还比较少,且模型相对比较理想化。

### 1.3.4 不同搜索装备的信息融合不够

对于舰载直升机搜潜手段而言,目前的文献主要集中在对声学探测设备(吊放声呐和声呐浮标)的搜潜战术和搜潜效能进行研究,对非声学搜潜设备(如雷达和红外)的搜潜战术和搜潜效能研究得不多,实际上,非声学搜潜设备是声学搜潜设备的重要补充。除了少量的文献介绍了吊放声呐与声呐浮标的协同搜潜外,并没有其他不同探测载荷协同作战使用的研究。

## 2 舰载直升机对潜跟踪研究现状分析

### 2.1 舰载直升机对潜跟踪的研究现状

反潜战中,为消灭或者阻止潜艇行动,须适时对敌潜艇进行跟踪。与对潜搜索相比,目前舰载直升机对潜跟踪的研究较少,且多以声呐浮标阵作为跟踪手段,在此基础上,利用算法对声呐浮标阵的布设进行优化。

文献[66]针对被动声呐浮标阵对潜跟踪的问题,利用双曲线交汇法进行定位,建立了对水下目标的跟踪模型;文献[67]利用最小二乘算法融合多枚浮标的测量信息,将其代入卡尔曼滤波器来估计水下目标的运动参数;文献[68]基于扩展卡尔曼滤波技术,建立了对水下目标进行跟踪的系统模型;文献[69]针对水下目标跟踪的问题,提出了两种被动全向声呐浮标阵的优化布放方法;文献[70]将人工鱼群算法应用于被动浮标对潜跟踪时的投放优化;文献[71]提出了用主动全向声呐浮标跟踪潜艇的优化布放方法;文献[72]从解决舰载直升机对潜跟踪时兵力需求问题出发,运用运筹分析思想,通过对舰载直升机对潜跟踪过程的分析,建立了在一定跟踪概率前提下所需舰载直升机数量的计算模型。

### 2.2 舰载直升机对潜跟踪研究存在的不足

就目前的文献来看,舰载直升机对潜跟踪主要是利用声呐浮标,对利用吊放声呐或者其他探测手段对潜跟踪研究得不多;实际上,在目标位置范围大致确定的情况下,根据需要可以用磁探仪实施精确定位和跟踪。另外,单机的对潜跟踪能力是比较有限的,可能还要考虑与其他跟踪兵力(直升机、水面舰艇、反潜巡逻机等)进行协同。

## 3 舰载直升机对潜攻击研究现状分析

对潜攻击是指舰载直升机使用攻潜武器,消灭敌方潜艇,或迟滞其行动,阻碍其实现战术企图。目前,舰载直升机主要使用航空反潜鱼雷和航空深弹遂行对潜攻击任务。

### 3.1 舰载直升机攻潜武器装备作战使用研究现状

#### 3.1.1 航空鱼雷作战使用研究现状

航空鱼雷是反潜直升机实施反潜作战的主要武器<sup>[73]</sup>,其作战使用的研究主要体现在以下3个方面。

##### 1) 航空鱼雷水下运动模型及攻潜过程研究。

文献[74]讨论了空投鱼雷的动力学和运动学模型并进行了半实物仿真;文献[75]建立了鱼雷水下运动的基本模型,研制了航空自导鱼雷搜攻潜模拟训练系统。

##### 2) 航空鱼雷发现目标概率及影响因素研究。

文献[76]采用卡尔曼滤波估计目标运动,根据鱼雷技术性能模拟搜攻潜过程,用蒙特卡罗法做统计试验得到攻击效果;文献[77]用圆目标面积覆盖法建立动态情况下鱼雷对目标的发现概率模型;文献[78]分析了目标运动特性以及干扰噪声对某型空投鱼雷主动声自导作用距离的影响;文献[79]研究了不同攻击方式、不同攻击阵位、目标初始信息及规避情况等对航空

鱼雷发现概率的影响;文献[80]提出了采用直升机悬停双雷齐射的方法,建立潜艇纯机动规避情况下鱼雷命中概率仿真模型;文献[81]研究了舰载直升机使用航空鱼雷实施对潜攻击时的最优落水点问题。

##### 3) 机-机以及舰-机协同对潜攻击的研究现状。

文献[82]通过建立欧拉方程和微分方程解决了反潜双机协同定位过程中的定位问题;文献[83]建立了舰载直升机引导火箭助飞鱼雷的阵位的仿真模型;文献[84]建立了火箭助飞鱼雷空中和 underwater 弹道模型,计算了舰载直升机引导火箭助飞鱼雷攻潜命中概率;文献[85]探讨了火箭助飞鱼雷使用中直升机安全问题;文献[86]从舰艇安全和目标定位的角度出发,研究了舰机协同使用火箭助飞鱼雷攻潜过程中的舰艇占位方法;文献[87]对舰机协同反潜过程中影响直升机引导水面舰艇鱼雷攻击效果的误差进行了分析;文献[88]对水面舰艇引导直升机进行鱼雷攻击的误差进行了分析。

#### 3.1.2 航空深弹作战使用研究现状

航空深弹主要用于攻击潜艇或水面目标,使用几乎不受水深的限制,且结构简单、造价低廉,是浅水海域反潜的主要武器。就目前可查阅的文献来看,其作战使用的研究主要体现在以下2个方面。

##### 1) 航空深弹水下运动模型及攻潜过程研究。

文献[89]建立了反潜直升机投放深弹模型,并利用 Simulink 对航空深弹空中弹道进行仿真;文献[90]在分析驱赶潜艇作战原则的基础上,利用航空深弹爆炸威力模型和潜艇壳体抗冲击模型,提出了驱赶潜艇目标的投弹瞄准点位置,计算了完成驱赶目标任务概率和对目标潜艇造成毁伤的概率。

##### 2) 航空深弹的命中概率及影响因素研究。

文献[91]建立了舰载直升机使用航空自导深弹攻潜模型,采用解析法计算了舰载直升机在不同条件下投放航空自导深弹攻击潜艇时的单发命中概率;文献[92]分析了不同投放时机和投放位置下直升机悬停投雷、飞行投雷和投放航空自导深弹的命中概率;文献[93]建立航空深度入水点的散布误差模型和空中弹道模型,并分析了反潜机投弹高度、投弹速度对航空自导深弹入水点的影响。

### 3.2 舰载直升机对潜攻击研究存在的不足

#### 1) 考虑海洋环境影响不够。

舰载直升机无论选择何种攻击设备,都应该考虑海洋环境对潜攻击的影响。就目前的文献来看,主要存在以下不足:1) 航空鱼雷的命中概率相对较高,选择使用时除了要考虑舰载直升机是否搭载之外,还应该考虑作战海区水深能否满足鱼雷的最低使用深度;2)

目前航空鱼雷或者深弹一般采用声自导方式来搜索、跟踪、攻击目标,不同的海洋环境必然会对声自导的距离产生影响,大部分文献对于鱼雷的声自导作用距离计算较为粗糙;3)在进行航空武器装备投放时,除了考虑直升机高度和速度对投放精度的影响,如果有风的存在,那么其必然会产生一定的影响,也需要建立模型进行考虑。

#### 2) 潜艇规避模型过于简单。

就目前的文献来看,潜艇规避模型普遍过于理想化,主要体现在以下 2 个方面:潜艇规避航空鱼雷或者深弹时,可能采取变速、变深、变向等手段,其规避必然会对鱼雷的声自导的探测距离产生影响;在潜艇规避航空鱼雷或者深弹探测时,大部分模型都没有考虑水声对抗设备(声诱饵或者声干扰器)对攻击结果产生的影响。

#### 3) 机-机协同和舰机协同对潜攻击的研究不够。

在目前技术条件下,舰载直升机的载重能力非常有限,单架直升机搭载情况要根据任务来定,如果执行搜潜任务的话,很有可能就不具备搭载攻潜武器的能力,需要引导直升机或者其他兵力进行协同攻击,这方面的建模还需要进一步精细化;另外,如果水面舰艇或者反潜巡逻机的声呐探测到的目标精度满足攻击条件,也可以引导直升机进行攻击,这方面的研究还相对比较少。

### 4 舰载直升机反潜作战使用的研究展望

#### 1) 注重与舰载直升机反潜作战实际的结合。

部分文献建立的模型有些理想化,存在一些与实际作战不相符的地方,比如并没有考虑舰载直升机的留空时间、搜攻潜设备的技战术性能,那么得出的结论或者结果就很可能是不合理、不科学的。因此,要注重与舰载直升机的作战实际相结合,针对具体的作战背景建立模型,确保仿真数据翔实,得出的结论对于提高部队的战斗力才有指导意义和参考价值。

#### 2) 重视海洋环境对反潜作战的影响。

海洋环境对于反潜作战的成败至关重要,需要把握好以下 2 个方面:加强海洋环境数据保障,利用各种渠道,充分收集、持续更新不同作战海域在不同季节的海洋环境数据,掌握各海区的海洋环境特点;建立海洋环境数据挖掘和分析系统,基于海洋环境数据库,针对任务需求,分析海洋环境的影响情况,给出有利的搜、攻潜武器设备的使用方案或建议,提高反潜行动的科学性。

#### 3) 进一步完善潜艇规避模型。

关于完善潜艇规避模型,需要把握好以下 2 个方

面:建立潜艇规避模型时,需要根据具体的战术背景,充分考虑潜艇规避手段,以及由此对探测设备或者攻潜武器声自导作用距离所产生的影响;单艇纯机动规避舰载直升机的搜索或攻击,效果未必理想,潜艇上装备大量的水声对抗设备,在建立潜艇规避模型时,有必要考虑水声对抗设备对搜、攻潜的影响。

#### 4) 加强对机-机和舰机协同反潜的研究。

水面舰艇作为舰载直升机的搭载平台,不仅扩展了直升机的反潜作战半径,其强大的声呐系统和声信号处理能力以及对潜攻击能力可以为舰载直升机提供有力的支援,因此,应充分考虑舰-机系统搜索的战法研究,并进行不断优化。

随着水面舰艇吨位的不断增大,其搭载能力不断增强,未来水面舰艇上可能搭载不止一架反潜直升机或者无人直升机,那么就有必要加强舰载直升机与直升机甚至无人直升机的协同反潜的研究,建立更加合理的协同反潜模型,形成完善的反潜体系。在此基础上,尽可能考虑使用几种不同的传感器进行搜索,互相弥补各自性能上的不足。

### 5 结束语

本文针对舰载直升机作战使用问题,分析了当前舰载直升机在对潜搜索、跟踪、攻击方面的研究现状与存在的不足,并且对其作战使用的研究重点进行展望,为舰载直升机的作战使用提供了参考。

#### 参 考 文 献

- [1] 李怀成,杨春魁.空中战术指挥[M].葫芦岛:海军飞行学院出版社,2004.
- [2] 陈新民.舰载直升机及其载舰[M].北京:海军出版社,1986.
- [3] 王新为,谭安胜.反潜巡逻机作战使用研究综述[J].军事运筹与系统工程,2015,29(4):72-79.
- [4] 杨日杰,蒋志忠,陈建勇,等.航空搜潜研究综述[J].海军航空工程学院学报,2010,25(5):552-558.
- [5] 张之胚.搜索论[M].大连:大连理工大学出版社,1992.
- [6] 屈也频.反潜巡逻飞机搜潜辅助决策系统建模与仿真研究[D].长沙:国防科技大学,2009.
- [7] 周田宰.吊放声呐搜潜技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [8] 王祖典.航空反潜声探设备[J].电光与控制,2006,13(3):1-4.
- [9] 沈培志,侯学隆,张海峰.吊放声纳主动探测距离建模与仿真[J].系统仿真技术,2011,7(1):63-66.
- [10] 陈建勇,喻荣兵,谢志敏,等.基于Kraken简正波模型

- 的吊放声纳最佳探测深度研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(7):1792-1795.
- [11] 李祥珂, 赵志允, 杜毅. 反潜直升机吊放声纳被动搜潜仿真与优化[J]. 电光与控制, 2015, 22(11):95-99.
- [12] 徐俊艳, 邱立军, 杨日杰. 基于蒙特卡罗方法的水下目标搜索技术[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(11):12-14, 18.
- [13] 吴福初, 王磊, 刘卫东. 反潜直升机吊放声纳搜潜效能[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(11):72-75.
- [14] 丛红日, 黄启来, 陈邓安. 单机吊放声纳巡逻搜索线长度模型研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(2):165-167.
- [15] 郭辉, 钱学东, 刘启军. 直升机吊放声纳搜潜机动建模仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(1):87-89.
- [16] 吴芳, 吴铭, 杨日杰. 反潜机吊放声纳扩展螺旋线形搜潜建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9):1137-1141.
- [17] 杨日杰, 田树东, 熊雄. 反潜直升机吊声搜潜悬停探测飞行模型[J]. 电光与控制, 2015, 22(4):8-12.
- [18] 吴芳, 杨日杰, 徐俊艳. 基于遗传算法的对潜螺旋搜索[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6):1682-1684.
- [19] 周田宰, 李居伟. 基于遗传算法的吊放声纳搜潜策略优化[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(2):77-79.
- [20] 吴铭. 基于先验目标航向的吊声扇面螺旋线搜潜建模[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12):2908-2912.
- [21] 白晶, 韩亮. 舰载直升机吊声的搜潜方法探讨[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(3):282-285.
- [22] 杨日杰, 桑春龙, 墨岩峰, 等. 改进的螺旋形搜索模型及其在吊放声纳应召搜潜中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(2):35-39.
- [23] 吴芳, 杨日杰. 多机吊放声纳应召搜潜建模与仿真[J]. 航空学报, 2009, 30(10):1948-1953.
- [24] 罗木生, 姜青山, 侯学隆. 正态圆分布下的双机吊放声纳扩展方形搜潜建模[J]. 电光与控制, 2012, 19(7):1-4.
- [25] 罗木生, 侯学隆, 王培源. 反潜巡逻机与反潜直升机协同反潜建模[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(1):53-57.
- [26] 曹黎明, 初磊, 赵鑫炎. 基于多声纳融合的舰-机协同搜潜研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(6):138-140.
- [27] 韩建辉, 杨日杰, 郑晓庆, 等. 舰载声纳与航空吊放声纳协同双基地搜索范围研究[J]. 声学技术, 2016, 35(2):114-119.
- [28] 张磊, 朱琳, 顾顺. 舰艇编队舰机协同反潜警戒模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(2):18-22.
- [29] 谭安胜, 叶丹, 赵金强. 驱护舰编队对潜防御效率与决策分析[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 20(4):65-69.
- [30] 王义涛, 门金柱, 周明. 模糊 AHP 的舰机协同对潜搜索方式优选[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(4):167-170.
- [31] 丛红日, 肖明强, 陈邓安. 直升机反潜巡逻线与编队之间同步问题研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(8):8-10.
- [32] 吴福初, 曹帅. 航母近程反潜区反潜直升机对潜警戒能力研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(1):27-32.
- [33] 丛红日, 赵元立, 李韬. 直升机侧翼护航倾斜三角形搜潜方法及其仿真[J]. 电光与控制, 2014, 21(1):23-27.
- [34] 丛红日, 周海亮, 陈邓安. 舰载反潜直升机蛇形机动前方护航搜索方法及其仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(6):158-161.
- [35] 汪志强, 谢国新, 郭磊. 登陆编队前置直升机防潜警戒配置方法及其仿真[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(7):35-39.
- [36] 罗木生, 曾家有, 侯学隆. 反潜直升机吊放声纳水面舰艇编队尾后锯齿形法搜潜[J]. 航空学报, 2017, 38(1):252-258.
- [37] 杨日杰, 何友, 孙明太. 航空搜潜装备搜潜范围建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11):1547-1549.
- [38] 蒋志忠, 杨日杰, 杨祥红, 等. 目标和环境特性对主动声呐浮标作用距离影响研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(2):43-45.
- [39] 郭新奇, 付霖宇, 蒋志忠, 等. 机载声呐浮标作用距离建模与仿真[J]. 电光与控制, 2011, 18(8):21-25.
- [40] 秦锋, 孙明太, 周利辉. 航空被动声呐浮标搜潜作战效能仿真模型[C]//2012年第14届中国系统仿真技术及其应用学术年会, 2012:535-539.
- [41] 梁巍, 杨日杰, 熊雄, 等. 主动全向声呐浮标性能预测[J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(3):385-389, 400.
- [42] 杨福渠. 声呐浮标最小二乘定位[J]. 声学与电子工程, 1998(4):1-4, 21.
- [43] 杨福渠. 声呐浮标最小二乘平面定位误差分析[J]. 声学与电子工程, 2002(2):23-27.
- [44] 魏继国, 屈也频. 航空声呐浮标定位的数据融合方法研究[J]. 航空电子技术, 2008, 39(2):34-38.
- [45] 胡柱喜, 孙明太, 苏维国, 等. 被动全向浮标 LOFIX 定位精度仿真分析[J]. 电光与控制, 2009, 16(12):26-29.
- [46] 孙辉, 孙明太, 刘京莲. 被动全向浮标 HYFIX 定位精度仿真分析[J]. 电光与控制, 2010, 17(1):85-88.

- [47] 崔旭涛,何友,杨日杰. 基于最小平方算法的被动浮标目标定位[J]. 信息与电子工程,2011,9(1):26-29.
- [48] 杨日杰,王正红,周旭,等. 浮标阵形对搜潜效能影响的研究[J]. 计算机仿真,2009,26(12):16-20.
- [49] 秦锋,孙明太,周利辉. 主动声纳浮标对纯机动规避潜艇探测效能研究[J]. 青岛大学学报:工程技术版,2013,28(3):46-51.
- [50] 袁杰,丛红日,李琰,等. 监听时间对声纳浮标阵检查性搜索效能影响仿真[J]. 海军航空工程学院学报,2010,25(6):711-715.
- [51] 匡贡献,谢志敏. 声纳浮标阵目标搜索优化布放算法[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26(5):508-512.
- [52] 曾海燕,杨日杰,周旭. 声纳浮标搜潜优化布放技术研究[J]. 指挥控制与仿真,2012,34(1):82-85.
- [53] 杨日杰,何友,田宝国. 双基地航空声纳搜潜距离误差估计[J]. 兵工学报,2004,25(5):540-543.
- [54] 吴芳,杨日杰,高青伟. 主/被动联合多基地航空搜潜建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(3):319-323.
- [55] 韩建辉,杨日杰,苗康乐,等. 一种定量度量航空声纳浮标阵多基地性能方法研究[J]. 测试技术学报,2015,29(4):315-320.
- [56] 张晓利,陈建勇. 吊放声纳与声纳浮标在应召搜潜中的联合运用[J]. 海军航空工程学院学报,2006,21(6):669-671.
- [57] 吴芳,杨日杰,高青伟. 基于先验目标航向的主/被动联合多基地航空搜潜建模与仿真[J]. 航空学报,2010,31(1):151-157.
- [58] 刘峰,沈治河. 舰载直升机对潜防御性应召搜索仿真分析[J]. 计算机仿真,2013,30(1):9-13.
- [59] 王祖典. 航空反潜非声探设备[J]. 电光与控制,2006,13(4):6-8,12.
- [60] 杨日杰,熊雄,郭新奇,等. 基于潜艇磁偶极子模型的航空磁探潜探测宽度模型与仿真[J]. 兵工学报,2014,35(9):1458-1465.
- [61] 单志超,曲晓慧,杨日杰,等. 潜艇航向对直升机磁异探潜的影响[J]. 火力与指挥控制,2013,38(2):62-64,68.
- [62] 单志超,刘贤忠,曲晓慧,等. 潜艇航速对应召磁异搜潜概率的影响[J]. 火力与指挥控制,2014,39(6):59-62.
- [63] 冯包根. 机载激光反潜探雷系统发展现状[J]. 电光与控制,1995,2(3):37-41.
- [64] 蒋志忠,杨日杰,李德鑫,等. 机载红外探测仪检查搜潜建模与仿真[J]. 红外与激光工程,2011,40(3):390-396.
- [65] 赵邵蕾,胡冬梅,魏石川. 航空反潜目力搜索概率[J]. 四川兵工学报,2010,31(3):39-41.
- [66] 战和,杨日杰,周旭. 基于被动声纳浮标投放法的水下目标跟踪[J]. 计算机工程,2010,36(2):282-284.
- [67] 李居伟,徐以成,孙明太. 被动定向声纳浮标的目标运动分析[J]. 电光与控制,2011,18(12):31-38.
- [68] 陶林伟,王英民. 基于扩展卡尔曼滤波的 DIFAR 浮标阵定位算法及分析[J]. 西北工业大学学报,2011,29(5):738-744.
- [69] 杨日杰,周旭,曾海燕. 被动全向声纳浮标跟踪潜艇的优化布放方法[J]. 指挥控制与仿真,2011,33(5):80-83.
- [70] 苗康乐,墨岩峰,张文训,等. 人工鱼群算法在浮标跟踪阶段的使用优化研究[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26(1):23-28.
- [71] 杨日杰,周旭,张林琳. 主动全向声纳浮标跟踪潜艇优化布放方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(10):2249-2253.
- [72] 尤廷悦,谢国新,樊洪港. 舰载直升机对潜跟踪兵力需求研究[J]. 舰船电子工程,2009,29(8):45-47.
- [73] 王祖典. 航空反潜战与反潜武器[J]. 航空兵器,2007(1):6-9.
- [74] 严卫生,任章,康风举,等. 某空投鱼雷浅水控制方案的半实物仿真[J]. 兵工学报,2000,21(2):184-186.
- [75] 陈遵银,吴卫玲. 航空自导鱼雷搜攻潜过程的模拟[J]. 南京理工大学学报,2001,25(2):121-124.
- [76] 陈遵银. 卡尔曼滤波在航空鱼雷攻击效果分析中的应用[J]. 青岛大学学报,2002,17(1):13-16.
- [77] 赵绪明,杨根源,黄晖,等. 一种计算航空反潜鱼雷发现概率的新方法[J]. 鱼雷技术,2006,14(5):54-57.
- [78] 李钊,郑援. 空投主动声自导鱼雷反潜仿真与分析[J]. 计算机仿真,2007,24(6):9-12.
- [79] 郑强,杨日杰,陈佳琪,等. 空投鱼雷发现概率的解析模型研究[J]. 电光与控制,2017,24(3):16-19.
- [80] 林宗祥,周明,门金柱. 直升机悬停双雷齐射初探[J]. 鱼雷技术,2008,16(3):49-51.
- [81] 宫旭,蔡云祥. 空投鱼雷最优落水点分析[J]. 指挥控制与仿真,2009,31(2):48-50.
- [82] 史伟. 舰载反潜双机协同定位及其误差估计问题研究[J]. 电光与控制,2013,20(7):42-44,72.
- [83] 冯学营. 火箭助飞鱼雷使用中的直升机引导阵位问题[J]. 火力与指挥控制,2009,34(1):123-125.
- [84] 赵学涛,贾跃,林贤杰. 舰载直升机引导火箭助飞鱼雷攻潜效能模型与仿真[J]. 鱼雷技术,2009,17(1):60-63.

- (6):485-501.
- [3] HARITAOGLU I, FLICKNER M D. Detection and tracking of shopping groups in stores[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001;I-431-I-438.
- [4] HARITAOGLU I, HARWOOD D, DAVIS L S. W4: real-time surveillance of people and their activities[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8):809-830.
- [5] AWERBUCH B, PELEG D. Concurrent online tracking of mobile users [C]//Proceedings of the Conference on Communications Architecture and Protocols, 1991; 221-233.
- [6] 王鑫,徐立中. 图像目标跟踪技术[M]. 北京: 人民邮电出版社,2012.
- [7] 周明珠,周治平,孙子文. 基于全局和局部信息的目标跟踪算法[J]. 光电工程,2015(4):19-24.
- [8] 初红霞,谢忠玉,王君祥,等. 空间相关背景加权直方图均值漂移目标跟踪[J]. 控制与决策,2014,29(3):528-532.
- [9] 闫河,刘婕,王朴,等. 基于 SUSAN 角点和 HSV 颜色模型的粒子滤波目标跟踪算法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(5):173-176, 221.
- [10] 孙继银,孙向东,王忠,等. 前视红外景象匹配技术[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [11] 卢建国,蔡安妮,李莉丽. 基于局部模板匹配的运动目标跟踪[J]. 光电子·激光,2011,22(2):297-301.
- [12] 陈瑞文. 基于改进的 BoVW 模型的图像检索方法研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2015,17(5):77-79.
- 
- (上接第66页)
- [85] 姜凯峰,周明,门金柱. 火箭助飞鱼雷作战使用中直升机安全问题初探[J]. 鱼雷技术,2010,18(1):72-75.
- [86] 刘兴林,鄂群,刘德才,等. 舰机协同反潜中影响直升机引导水面舰艇鱼雷攻击效果的误差因素分析[J]. 舰船科学技术,2010,32(5):76-79.
- [87] 曲延明,杨军,周明,等. 舰机协同使用火箭助飞鱼雷攻潜中的舰艇占位方法[J]. 鱼雷技术,2011,19(4):303-306.
- [88] 鄂群,马远良,刘德才,等. 水面舰艇引导直升机鱼雷攻击误差分析[J]. 鱼雷技术,2009,17(5):72-76.
- [89] 陶万成,杨日杰,熊雄,等. 航空深弹投放模型及空中弹道仿真[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26(5):525-529.
- [90] 孙明太,任东彦,李居伟,等. 使用航空深弹驱赶潜艇建模与仿真[J]. 鱼雷技术,2012,20(6):449-453.
- [91] 姜选凯,赵学涛,贾跃. 航空自导深弹攻潜命中概率分析[J]. 火力与指挥控制,2009,34(8):64-67.
- [92] 郑晓庆,杨日杰,赵轩坤. 投放时机和投放位置对航空攻潜武器命中概率的影响[J]. 测试技术学报,2013,27(1):87-92.
- [93] 吴芳,吴铭,高青伟,等. 飞机运动态势对航空深弹入水点散布影响分析[J]. 火力与指挥控制,2016,41(4):35-37.
- 
- (上接第83页)
- [7] 刘文浩,鲁世红,王伟. 基于可靠性数据的航材备件需求预测方法[J]. 航空计算技术,2017,47(4):53-56.
- [8] SALMAN S, CASSADY C R, POHL E A, et al. Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(4):445-457.
- [9] 杨秉喜,李金国,张义芳,等. 备件供应规划要求(GJB4355-2002)[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2003.
- [10] 崑诗松,程依明,濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2011.
- [11] 王玉龙,金灿,冉红亮,等. 威布尔分布备件的蒙特卡洛模拟配置[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2018(1):159-162.
- [12] 张志华. 可靠性理论及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2012.