

舰艇编队航渡中多机伴随反潜研究

罗木生¹, 王俊敏¹, 梁春芳^{1,2}

(1. 海军航空工程学院, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军91515部队, 海南三亚 572016)

摘要: 针对舰艇编队航渡过程中的多架舰载反潜直升机前出执行伴随反潜作战问题进行研究。通过分析潜射鱼雷射距, 建立了理想条件与编队规避机动两种情况下的鱼雷攻击阵位模型, 从而得出伴随反潜区的阵位配置。在此基础上, 对编队航渡过程中的多机伴随反潜方法进行了分析, 并建立了伴随反潜兵力需求与探测概率模型。最后仿真计算了潜射鱼雷发射阵位, 以及反潜兵力数量、探测次数、伴随反潜区大小对发现概率的影响。结果表明, 伴随反潜区配置在编队前方20 n mile处, 大小为20 n mile × 30 n mile, 反潜直升机数量3架为宜。

关键词: 多机伴随反潜; 舰艇编队; 反潜阵位配置; 航渡过程; 机动规避; 鱼雷攻击

中图分类号: V271.4; U674.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)12-0020-05

Multi-Aircraft Accompanying Antisubmarine in Ferry Process of Naval Ship Formation

LUO Mu-sheng¹, WANG Jun-min¹, LIANG Chun-fang^{1,2}

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 91515 of PLA, Sanya 572016, China)

Abstract: The issue of accompanying antisubmarine executed by multiple antisubmarine helicopters in naval ship formation ferry process was studied. Based on analysis to torpedo firing distance, we established torpedo attack position models for ideal condition and formation evasion maneuver condition, and obtained the antisubmarine configuration position. Then, the multi-aircraft accompanying antisubmarine methods were analyzed, and models were built up to calculate detection probability and the needed antisubmarine force. Finally, simulation was made to analyze the submarine torpedo firing position, and the effect of antisubmarine helicopter quantity, detection times, antisubmarine area size on the detection probability. The results show that: 1) The appropriate quantity of antisubmarine helicopter is three; and 2) The accompanying antisubmarine area should be set at 20 n miles in front of the formation with the size of 20 n mile × 30 n mile.

Key words: multi-aircraft accompanying antisubmarine; naval ship formation; antisubmarine position configuration; ferry process; evasion maneuver; torpedo attack

0 引言

水面舰艇编队航渡过程中, 易遭到敌方潜艇的攻击, 尤其是当敌方潜艇采用阵地伏击战术时。现代先进潜艇的静音性能优良^[1-2], 其进入伏击阵地后一般采用悬停或微速航行等战术措施, 使得被动声纳难以发现其踪迹; 而水面舰艇的主动声纳探测距离有限, 难以实施有效的对抗。因此, 由舰载反潜直升机前出执行伴随护航反潜任务, 是对抗此类威胁、保障编队航渡

安全的有效手段之一。

舰载反潜直升机反潜作战, 国内外已进行了很多研究^[3-12]。较多的研究是从反潜直升机采用的搜索法^[3-7]或使用的搜潜器材^[8-12]方面进行建模分析, 而关于舰载反潜直升机执行伴随反潜作战, 尤其是反潜阵位配置, 进行的研究工作还较少。目前国内仅在伴随护航区域、伴随护航方法等方面进行了初步的定性分析研究, 缺乏必要的模型支持和仿真验证。本文以舰艇编队航渡过程为背景, 在建模分析伴随反潜区域配置的基础上, 对多架舰载反潜直升机执行伴随反潜作战进行研究。

1 舰载反潜直升机伴随反潜

前置法是舰载反潜直升机伴随反潜的主要方法之

收稿日期: 2013-12-23

修回日期: 2014-02-27

基金项目: 总装备部仿真预研资助项目(513040501)

作者简介: 罗木生(1982—), 男, 江西广昌人, 博士, 讲师, 研究方向为兵种战术学。

一,是对抗敌潜艇阵地伏击战术而采取的一种反潜战术。阵地伏击是指潜艇在舰艇编队可能的航线上设置伏击阵地,当舰艇编队进入其设伏阵地时,伺机对编队实施侦察或实施鱼雷、导弹攻击。该战术几乎适合于所有性能的潜艇,尤其是机动能力较差潜艇的首选突击战术。但是,采用这种战术时需要准确地获知编队的航线信息。

前置伴随反潜,一般将反潜直升机配置在编队前方航线上一定区域进行反潜,其目的是始终能够为航渡中的编队提供反潜警戒和足够的防御纵深,及时发现敌潜艇并进行攻击,或迫使敌潜艇脱离伏击阵地。前置伴随反潜中,首要问题是反潜阵位的设置及反潜兵力的配置,这也是本文主要的研究内容。

反潜直升机搜索水下目标的器材主要有吊放声纳、声纳浮标、磁探仪等。吊放声纳可反复使用、主被动变换容易、探测距离较远,且通过反潜直升机的机动,可在反潜区任意位置进行探测,较其他器材更适合伴随反潜。因此,本文主要对多机使用吊放声纳执行前置伴随反潜相关问题进行研究。

2 舰艇编队航渡中伴随反潜区建模分析

在经过潜艇威胁区时,为充分保证舰艇编队航渡中的安全,反潜兵力应对编队前方一定距离的海区进行搜索,尽可能地消除潜艇威胁。一般的前置伴随反潜方法是:反潜兵力成线形配置在垂直航线方向,构成线形反潜拦截区,且反潜区向前移动的平均速度与编队一致,从而确保反潜阵位的相对稳定,暂称此法为伴随反潜线。但存在以下问题:敌潜艇能进行规避,从而逃过探测,继而威胁编队安全;难以对同一区域进行多次搜索;有效的搜索面积较小,难以提供足够的反潜纵深;多机协同反潜的组织与指挥较为复杂。

为解决这些不足,将伴随反潜线变为伴随反潜区,即在编队前方航线上,确定若干个相邻的前置伴随反潜区,其中之一如图 1 所示。

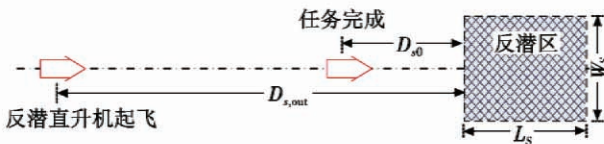


图 1 伴随反潜区阵位

Fig. 1 Position of accompanying antisubmarine

反潜兵力提前一定时间对该区域进行反复搜索,当编队与反潜区的距离为 $D_{s,0}$ 时,反潜兵力完成对伴随反潜区的搜索。该方法将动态的伴随反潜线,变为相对静止的区域检查反潜,且反潜兵力能够对区域内进行多次反复搜索,使敌潜艇难以进行有效的规避,易达

成驱赶或对潜打击、保障编队航渡安全的作战企图。

伴随反潜区的关键问题是确定反潜区的长度 L_s , 宽度 W_s 以及在什么距离 $D_{s,0}$ 上结束搜索能保障编队的安全、提高反潜兵力的效能。由于编队航渡速度较高,且编队中一般有反潜能力较强的水面舰艇,因而前置反潜区的宽度不宜过大。但为了防御潜艇的侧翼攻击,反潜区应覆盖侧翼的鱼雷发射阵地。

敌潜艇为保障自身安全、降低被发现概率,一般在鱼雷的最大射距上进行攻击。采用阵地伏击战术的敌潜艇,攻击舰艇编队的主要武器是潜射线导鱼雷。下面主要从敌潜艇可能的鱼雷攻击阵位入手,进行建模分析。

2.1 敌潜艇鱼雷攻击的理想阵位建模

敌潜艇发射鱼雷后,鱼雷应在航程内与目标相遇,否则无法命中;因而,对于不同位置、不同航速的目标,鱼雷的最大射距不同。因此,需解算不同攻击舷角下鱼雷的最大射距,从而得出鱼雷攻击阵位。

鱼雷攻击过程较为复杂,为简化分析,先考虑理想条件下,鱼雷从最大射距上发射的情况,即舰艇编队匀速直线航行,敌潜艇能准确获知舰艇目标位置,且鱼雷发射后朝着相遇点运动。因此,设舰艇编队以平均速度 V_s 直线航行;敌潜艇鱼雷航程 R_{tor} ,发射时与目标的距离为 D_0 ,位于 B 点,平均航速为 V_{tor} ,朝着相遇点运动,于 A 点与舰艇目标相遇,水平面上的空间位置关系如图 2 所示。

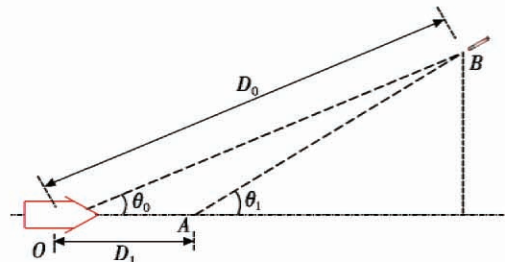


图 2 鱼雷攻击阵位示意图

Fig. 2 The submarine torpedo attack position

由几何关系得

$$\begin{cases} V_{tor}t\cos\theta_1 = D_0\cos\theta_0 - D_1 \\ V_{tor}t\sin\theta_1 = D_0\sin\theta_0 \\ D_1 = V_s t \end{cases} \quad (1)$$

且由鱼雷航程限制,有

$$V_{tor}t < \kappa \cdot R_{tor} \quad (2)$$

式中, κ 表示鱼雷有效射距系数,为不大于 1 的正数。 κ 取 0.8 时,即在鱼雷航程的 80% 处发射鱼雷,此时的射距称为有效发射距离,简称有效射距。

根据式(1)、式(2)可解算出鱼雷发射阵位,即不同 θ_0 下的最大射距 $D_{0,max}$ 。只有在该距离之内发射鱼

雷,才有可能命中目标。

2.2 编队机动影响下的鱼雷攻击阵位

实际作战中,如果发现攻击自身的鱼雷,舰艇编队通常采取转弯机动等方式,以规避鱼雷。显然,如果敌潜艇在鱼雷最大射距上攻击,则舰艇编队采取一定的规避措施,将显著降低鱼雷的命中概率。所以,为提高命中概率,敌潜艇较少在其鱼雷最大射距上进行攻击。下面将对舰艇编队采取转弯规避下的鱼雷攻击阵位进行建模。

编队规避与鱼雷攻击过程复杂,难以对整个过程中进行建模,因而进行简化做如下假设:

- 1) 编队能发现距其 d_f 范围内的鱼雷,且一旦发现鱼雷立即进行规避机动;
- 2) 编队只进行一次规避机动,规避方向为使得鱼雷运动距离最大;
- 3) 鱼雷总能发现其攻击目标,考虑到敌潜艇声纳探测过程,假定编队转弯 t_{delay} 时间后,鱼雷才能获得编队位置信息,并开始转弯追击其目标。潜射鱼雷主要是线导,所以潜艇探测到的目标信息能传给鱼雷,但潜艇探测目标需要一定的时间,因而做此假设。

在假设的基础上,设某时刻舰艇编队发现距其 d_f , 方位 ψ_{AB} 的鱼雷,如图3所示,编队立即以半径 r_s 转弯 φ_s , 航向由 ψ_s 转为 ψ_{EC} , 然后直线航行; 编队转弯 t_{delay} 时间后鱼雷到达 B 点, 开始以半径 r_T 转弯 φ_T , 航向由 ψ_T 转为 ψ_{HC} , 最终于 G 点与目标相遇。所以有

$$\frac{d_1 + r_s \varphi_s}{V_s} - t_{\text{delay}} = \frac{d_2 + r_T \varphi_T}{V_T} \quad (3)$$

$$d_{TB} + d_2 + r_T \varphi_T < \kappa \cdot R_{\text{tor}} \quad (4)$$

式中, d_{TB} 为鱼雷发射后运动至 B 点的位移, 根据该值与 ψ_T , 可解算出鱼雷发射点坐标, 从而得出鱼雷运动的距离; d_1, d_2, φ_T 未知, 可根据三角关系进行求解。

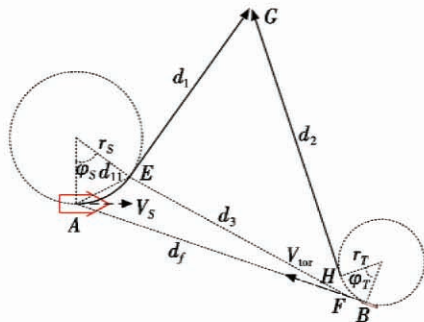


图3 编队转弯规避时的鱼雷攻击示意图

Fig. 3 The submarine torpedo attack chart when ship formation makes evasion maneuver

根据 d_{TB} 的取值区间以及方位角 ψ_T , 可反推出鱼雷的发射点。

在 $\triangle EFG$ 中, 有

$$\begin{cases} d_1 \cos(\angle GEF) + d'_2 \cos(\angle GFE) = d_3 \\ d_1 \sin(\angle GEF) = d'_2 \sin(\angle GFE) \\ d'_2 = d_2 + r_T \tan(\varphi_T/2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\angle GEF$ 可由 ψ_{FE} 和 ψ_{EC} 求得; $\angle GFE$ 可由 ψ_{FE} 和 ψ_{HC} 求得。

在 $\triangle AEF$ 中, 根据余弦定理有

$$d_3 = \sqrt{d_{11}^2 + d_{f1}^2 - 2d_{11}d_{f1}\cos(\angle EAF)} \quad (6)$$

式中: $d_{11} = \varphi_s r_s$; $d_{f1} = d_f - r_T \tan(\varphi_T/2)$; $\angle EAF$ 可由 ψ_{AB}, φ_s 求解得出。同理, 根据余弦定理, 可求得 $\angle EFA$, 然后再根据方位角 ψ_{AB} , 得出方位角 ψ_{FE} 。

2.3 伴随反潜区的确定

综合上文的建模分析可知, 伴随反潜区的阵位设置应考虑编队航行诸元、敌潜艇性能及其鱼雷攻击距离等因素。此外, 舰载反潜直升机在反潜区反潜时, 也应考虑是否会影响护航反潜舰艇声纳探测或受其影响。伴随反潜区的大小主要受舰载反潜直升机数量、反潜直升机性能及其搜潜器材性能、海洋环境等因素的限制。

为可靠地发起攻击, 并安全脱离伏击阵地, 敌潜艇在鱼雷有效射距上发起攻击的概率很高。因此, 前置伴随反潜区应覆盖这些区域, 尽可能地在鱼雷发射之前发现敌潜艇, 对其进行攻击或驱赶。所以, 反潜区应覆盖 κ 为 1 和 0.8 所对应的鱼雷攻击理想阵位与编队机动影响下的鱼雷攻击阵位。

3 舰艇编队航渡中多机伴随反潜建模

为保障编队航渡过程中的安全, 伴随反潜区一般较大, 单架舰载反潜直升机搜潜能力有限, 因此, 一般采用多机执行伴随反潜任务。

3.1 多机伴随反潜方法分析

多机在伴随反潜区反潜时, 使用吊放声纳探测的方法较多, 如平(并)行搜索法、多段搜索法和锯齿形搜索法等^[13]。

若吊放声纳采用主动工作方式, 敌潜艇很有可能获知探测点位置。所以, 若反潜直升机采用规则搜索方法, 则敌潜艇可以较为准确地预测出下一个探测点, 能通过规避机动而避免被发现。

因此, 多机伴随反潜时, 吊放声纳若采用主动工作方式, 则多机搜索方法采用锯齿形搜索法或随机搜索法是合适的。吊放声纳采用被动工作方式时: 1) 若兵力充足, 可采用多机平(并)行搜索法, 搜索速度和推进方向与编队航向一致; 2) 若兵力不足, 无法采用平(并)行搜索方法, 可采用锯齿形搜索法或随机搜索法;

3) 若兵力严重不足,采用随机搜索法。

前置伴随反潜,主要是为了探测采用阵地伏击的敌潜艇,因而吊放声纳采用主动工作方式,所以,多机伴随反潜采用锯齿形搜索法或随机搜索法。

3.2 多机伴随反潜兵力需求与发现概率模型

伴随反潜区的大小、反潜器材性能、反潜直升机性能是影响多机伴随反潜兵力数量的主要因素。设伴随反潜区长 L_s , 宽 W_s , 吊放声纳有效探测距离 R_{sonar} , 那么为了实现对所有伴随反潜区至少探测一次, 需要直升机的数量为

$$N_{hel} = \left\lceil \frac{L_s \cdot W_s}{\pi R_{sonar}^2 N_{pt}} \right\rceil \quad (7)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 表示取不小于该值的最小整数; N_{pt} 为单架反潜直升机出动一次的悬停探测次数。即

$$N_{pt} = \lfloor T_{hel,sear} / T_{sonar,cyc} \rfloor \quad (8)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取不大于该值的最大整数; $T_{hel,sear}$ 为反潜直升机用于搜索的时间; $T_{sonar,cyc}$ 为反潜直升机使用吊放声纳的搜索周期, 计算方法可参考文献[13]。

设反潜直升机航渡速度为 V_{hel} , 留空时间为 $T_{hel,tot}$, 则

$$\begin{cases} T_{hel,out} + T_{hel,sear} + T_{hel,back} \leq T_{hel,tot} \\ T_{hel,out} = D_{s,out} / V_{hel} \\ T_{hel,back} = (D_{s0} + L_s) / V_{hel} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $T_{hel,out}$ 为直升机出航航渡时间; $T_{hel,back}$ 为返航航渡时间。

当舰艇编队距反潜区为 D_{s0} 时, 反潜区应搜索完毕, 则

$$V_s (T_{hel,out} + T_{hel,sear}) = D_{s,out} - D_{s0} \quad (10)$$

由式(9)、式(10)可解算出反潜直升机在反潜区的搜索时间 $T_{hel,sear}$, 以及反潜直升机起飞时与反潜区的距离 $D_{s,out}$, 再根据式(7)、式(8)可得出所需的反潜直升机数量。

对搜索区进行多次且可能重叠的搜索, 则发现潜艇的概率为^[14]

$$P_f = 1 - \exp(-\pi R_{sonar}^2 N_{hel} P_{js} N_{pt} / (L_s \cdot W_s)) \quad (11)$$

式中, P_{js} 为吊放声纳与目标发生接触并对其正确识别的概率, 一般取 0.65 ~ 0.9^[14]。式(11)是对搜索成功概率的一种保守估计。

4 仿真分析

设舰艇编队平均航渡速度为 20 kn (1 kn = 1.852 km/h), 能发现距其 15 km 内的鱼雷; 鱼雷平均航速 45 kn, 航程 50 km^[15], 重新获得目标信息的时间为 3 min。以舰艇编队位置为坐标原点, 以其航向为 X 轴正方向, 垂直航向为 Y 轴建立坐标系; κ 分别取 1.0 和 0.8 时, 鱼雷

攻击阵位的仿真结果如图 4 所示。

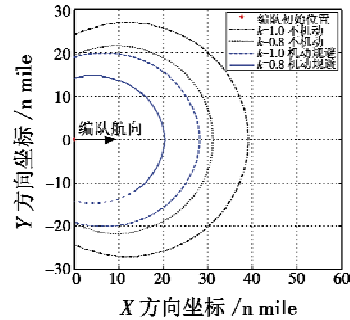


图 4 潜艇鱼雷发射阵位平面图

Fig.4 Planar view of submarine torpedo launching position

从图 4 中可得出, 舰艇编队规避机动能有效缩短鱼雷的最大射距; 相同参数下, 与不规避相比, 机动规避时的鱼雷最大射距缩短了 10 n mile 左右。所以, 舰艇编队规避机动不仅能规避鱼雷的追击, 同时也能限制鱼雷的发射阵位。

若从 $\kappa = 1.0$ 所得出的阵位发射鱼雷, 则鱼雷将在与其目标相遇时航程耗尽, 因而该阵位为鱼雷的最远发射阵位。从图 4 中得出, 若不考虑编队规避机动, 鱼雷最远发射阵位为编队前方 39 n mile 处、侧翼 24 n mile 处; 若考虑规避机动, 鱼雷最远发射阵位为编队前方 28 n mile 处、侧翼 20 n mile 处。如果从鱼雷航程的 80% 处发射, 两种情况下的鱼雷最大射距分别为编队前方 31 n mile 和 20 n mile, 侧翼则为 20 n mile 和 15 n mile。因此, 伴随反潜区的长度 L_s 取为 20 n mile, 宽度 W_s 取 30 n mile, D_{s0} 取 20 n mile。

设反潜直升机飞行速度为 200 km/h, 留空时间为 4 h, 使用吊放声纳的搜索周期为 10 min; 吊放声纳有效探测距离为 6 km, 接触概率为 0.9, 则仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同反潜兵力反潜的仿真结果

Table 1 Simulation result of different antisubmarine forces

| $L_s/n \text{ mile}$ | 单架反潜直升机 | | | 双机编队 | | | 三机编队 | | |
|----------------------|---------|----------|-------------|-------|----------|-------------|-------|----------|-------------|
| | P_f | N_{pt} | $D_{s,out}$ | P_f | N_{pt} | $D_{s,out}$ | P_f | N_{pt} | $D_{s,out}$ |
| 15 | 0.652 | 16 | 90.0 | 0.879 | 16 | 90.0 | 0.958 | 16 | 90.0 |
| 20 | 0.547 | 16 | 90.0 | 0.795 | 16 | 90.0 | 0.907 | 16 | 90.0 |
| 25 | 0.470 | 16 | 90.0 | 0.718 | 16 | 90.0 | 0.850 | 16 | 90.0 |
| 30 | 0.410 | 15 | 86.2 | 0.652 | 15 | 86.2 | 0.795 | 15 | 86.2 |

对于相同的伴随反潜海区, 反潜兵力的增加能显著提高发现概率, 但并非成倍变化; 若 L_s 减少, 即伴随反潜海区面积减小, 将增加探测次数, 提高发现概率, 但是也将增加伴随反潜区的数量, 导致反潜兵力的出动批次增加。

对于伴随反潜区为 20 n mile × 30 n mile 的区域, 发现概率与反潜兵力数量、探测次数变化关系的仿真结果如图 5 所示。

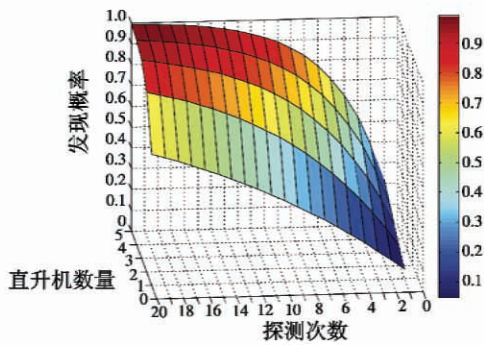


图5 发现概率与反潜兵力数量、探测次数的仿真图

Fig.5 Simulation result with different antisubmarine forces and detection times

直升机数量的增加将提高发现概率,但增幅降低,从图5中可以看出,直升机数量为3架较为合适;直升机悬停探测次数的增加使得发现概率增加,因而可通过增加搜索时间,如缩短直升机出航距离等方法,提高发现概率,但当探测次数增加到16次左右时,发现概率的增幅很小,效果不明显。若直升机留空时间不足4h,可通过增加搜索兵力或适当改变伴随反潜区的大小等方式,以确保反潜兵力能以较高的发现概率对伴随反潜区实施搜索。

5 结束语

现代静音型潜艇以及阵地伏击战术的运用,对航渡中的舰艇编队构成了严重的水下威胁。因此,为有效保障编队航渡安全,通过运用舰载反潜直升机实施前置伴随反潜,能弥补编队航渡中反潜能力的不足。本文通过建模与仿真,得出以下结论。

1) 舰艇编队采用规避机动策略,压缩了敌潜艇的鱼雷发射阵位;本文仿真参数下,与不规避相比,机动规避使得鱼雷最大射距缩短了10 n mile左右。

2) 本文仿真参数下,鱼雷的理想攻击阵位为舰艇编队前方20~40 n mile的区域,所以伴随反潜区应设置在编队前方20~40 n mile处;若伴随反潜区为20 n mile×30 n mile,反潜直升机数量3架为宜。

3) 反潜直升机探测次数的增加能提高发现概率,但当探测次数超过一定值时,增幅不明显。

伴随反潜区的阵位与反潜区的大小、反潜兵力的数量是舰载反潜直升机伴随反潜的关键问题;本文建立了相关的计算模型,可为舰艇编队指挥员制定和实施伴随反潜提供决策依据。

参考文献

[1] 汪玉,姚耀中. 世界海军潜艇[M]. 北京:国防工业出版社,2006:130.
WANG Y, YAO Y Z. World navy submarine[M]. Beijing:

National Defense Industry Press, 2006:130.

- [2] 王伟生.“苍龙”号——日本潜艇技术新进展[J]. 当代海军,2009,4:52-55.
WANG W S. “Cang Long”—new development of Japanese submarine technology[J]. Modern Navy, 2009, 4: 52-55.
- [3] DANSKIN J. A helicopter versus submarine search game[J]. Operations Research, 1968, 16:509-517.
- [4] CHUAN E C K. A helicopter submarine search game[D]. Monterey:Naval Postgraduate School, 1988.
- [5] 鄂群,马远良,刘德才. 舰机时间协同对潜检查搜索样式[J]. 火力与指挥控制,2009,34(10):115-116.
E Q, MA Y L, LIU D C. Ship-heli cooperating area checking anti-submarine searching mode[J]. Fire Control and Command Control, 2009, 34(10):115-116.
- [6] 张圣云,张安,王立柱,等. 反潜飞机对潜搜索法研究[J]. 火力与指挥控制,2006,31(1):70-74.
ZHANG S Y, ZHANG A, WANG L Z, et al. A study on searching for submarine by antisubmarine airfly[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(1):70-74.
- [7] 董朝峰. 直升机对定向定速运动目标的搜索法[J]. 火力与指挥控制,2008,22(5):39-41.
DONG C F. Study on searching method of helicopter on submarine with definite direction and velocity[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 22(5):39-41.
- [8] MARTIN J. Multiplying the effectiveness of helicopter ASW sensors[J]. Sea Technology, 2006, 47(11):33-36.
- [9] 吴铭. 多机吊放声纳检查搜潜建模与仿真研究[J]. 计算机工程与设计,2010,31(3):676-679.
WU M. Simulation research and model building based on checking submarine search of multi-aircraft dipping sonar[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(3):676-679.
- [10] 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.
WU F, YANG R J. Model building and simulation based on definite second time submarine search by multi-aircraft dipping sonar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10):1948-1953.
- [11] 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.
BAI J, HAN L. Search method of dipping sonar on shipborne antisubmarine aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(3):282-285.
- [12] 吴芳,杨日杰,桑春龙. 基于先验目标航向的吊放声纳应召搜潜建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(20):6630-6633.

(下转第29页)

间对飞机飞行品质和 PIO 敏感性的影响程度。由于飞行控制系统的复杂性,频域法往往会忽略飞机传感器、舵机动力学特性等附加延迟时间。而时域法可以弥补此不足,通过对 PIO 过程时间历程曲线分析,可获得附加延迟时间与 PIO 发生之间关系的定量值。

参 考 文 献

- [1] 高金源,李陆豫,冯亚昌,等. 飞机飞行品质[M]. 北京:国防工业出版社,2003:154-160.
GAO J Y, LI L Y, FENG Y C, et al. Aircraft flying qualities[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 154-160.
- [2] 冯亚昌,李陆豫. 电传飞机人机闭环系统的诱发振荡[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(1):30-33.
FENG Y C, LI L Y. Induced-oscillation of man-vehicle closed system of FBW aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(1): 30-33.
- [3] 吴蔚,方振平. 某电传操纵飞机的 II 型 PIO 预测和抑制对策研究[J]. 航空学报,2002,23(3):231-233.
WU W, FANG Z P. Analysis and prediction of pilot-induced oscillation with actuator rate limiting of a fly-by-wire fighter and a method for alleviating PIO [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(3): 231-233.
- [4] 熊灵芳,方振平. 用同一理论预测飞机飞行品质和 PIO 敏感性[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(3):227-231.
XIONG L F, FANG Z P. Prediction of aircraft handling qualities and pilot induced oscillation susceptibility using unified theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3): 227-231.
- [5] 曲菊香,谭文倩. 双通道人机控制系统中的驾驶员模型识别[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(1):66-69.
QU J X, TAN W Q. Identifying human pilot model in two-axis control task [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 66-69.
- [6] 李建平,杨朝旭,罗欣. 作动器速率饱和时的 PIO 抑制方法[J]. 航空学报,2003,24(3):263-265.
LI J P, YANG Z X, LUO X. Method to prevent pilot-induced-oscillations due to actuator rate limiting [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(3): 263-265.
- [7] 田福礼,高正红,颜世伟. 基于傅立叶变换和模糊逻辑的 APC/PIO 探测方法[J]. 飞行力学,2008,26(3):10-13.
TIAN F L, GAO Z H, YAN S W. APC/PIO detect method based on Fourier transform and fuzzy logic [J]. Flight Dynamics, 2008, 26(3): 10-13.
- [8] 孟捷,徐浩军,武卫. 驾驶员模型对 II 型 PIO 预测影响研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(12):3816-3819.
MENG J, XU H J, WU W. Research on prediction of category II PIO affected by pilot model [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3816-3819.
- [9] GAJIC Z. 线性动态系统与信号[M]. 王立琦,韩崇昭,译. 西安:西安交通大学出版社,2004:478-509.
GAJIC Z. Linear dynamic systems and signals [M]. Translated by WANG L Q, HAN C Z. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004: 478-509.
- [10] SMITH R E. Effects of control system dynamics on fighter approach and landing longitudinal flying qualities [R]. America: AFFDL-TR-122, 1978.
- [11] 孟捷,徐浩军,朱亚明. 驾驶员诱发振荡预测方法应用研究[J]. 飞行力学,2009,27(1):15-19.
MENG J, XU H J, ZHU Y M. Research on pilot induced oscillation prediction method and its application [J]. Flight Dynamics, 2009, 27(1): 15-19.
- [12] ASHKENAS I L, HOH R H, TEPER G L. Analysis of shuttle orbiter approach and landing [J]. Guidance Control and Dynamics, 1983, 6(6): 448-455.
- [13] BERRY D T, POWERS B G, SZALAI K J, et al. In-flight evaluation of control system pure time delays [J]. Journal of Aircraft, 1982, 19(4): 318-323.
- [14] KLYDE D H, MITCHELL D G, ASHKENAS I L. Proposed time delay limits for DFBW transports in precision landing [R]. America: TR-1284-1, 1993.
- (上接第 24 页)
- WU F, YANG R J, SANG C L. Building and simulating definite second time submarine search models of dipping sonar based on transcendental target moving course [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6630-6633.
- [13] 孙明太. 航空反潜战术[M]. 北京:军事科学出版社,2003.
SUN M T. Air antisubmarine tactical [M]. Beijing: Military Science Press, 2003.
- [14] 赵晓哲,沈洽河. 海军作战数学模型[M]. 北京:国防工业出版社,2004:40-41.
ZHAO X Z, SHEN Z H. Navy operational mathematic model [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 40-41.
- [15] MK-48 Torpedo [DB/OL]. [2013-12-20]. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/mk-48.htm>. 2011.