

文章编号: 1673-1522 (2011) 01-0036-05

国外固定翼预警机 空域巡逻航线的预警空域分析

贾临生¹, 吴文海¹, 高伟¹, 王俊彦²

(1. 海军航空工程学院青岛分院; 2. 92635 部队, 山东 青岛 266041)

摘要: 通过探讨空域巡逻航线适用的战场环境, 介绍了空域巡逻航线可以提供的预警空域, 基于 SEA 的基本原理, 阐述了弱效区预警效能问题, 并以算例分析了影响预警空域的因素, 从而为固定翼预警机的战术使用提供参考。

关键词: 固定翼预警机; 战术使用; 系统效能分析; 系统映射; 使命映射; 防空预警

中图分类号: E83; V32

文献标志码: A

现代战争中制空权的重要性毋庸置疑。掌握制空权的前提是在一定的时域对战区空域进行有效预警监控。固定翼预警机可以在中空长时远程巡航, 装备了具有俯视与仰视能力的雷达, 在一定空域实现 360° 远距探测, 战时可根据需要迅速部署, 支援和加强对空警戒薄弱的方向, 是对空作战的主要装备^[1]。

不同的巡逻航线形成的预警空域有所不同, 预警机在不同巡逻航线上形成的预警空域对不同时机和方向的来袭目标进行预警的效果是不同的。本文重点研究空域巡逻航线的预警空域, 讨论了影响预警空域强效区的因素, 基于 SEA 的原理分析了弱效区的预警效能, 为预警机的战术使用提供参考^[2-3]。

1 空域巡逻航线的适用场合

如图 1 所示的空域巡逻航线^[4]是指预警机在规定的时间和空间, 采用跑道型或“8”字形航线巡逻, 对战区的一定空域进行连续监控。其中, “8”字形航线适用于侧风比较大的情况, 属于特殊条件下的跑道型巡逻航线。

空域巡逻航线适合固定翼预警机前出一定距离, 在威胁方向上遂行巡逻, 可为己方的防御体系提供一个如图 2 所示的预警扇区, 以空间换取时间, 为拦截目标赢得一定的反应和准备时间。预警机发现目标需要综合考虑雷达性能、探测区域及预警效

能。雷达性能与电子技术水平有关^[5], 在此不做讨论。下面讨论如何设置预警空域来提高预警效能。

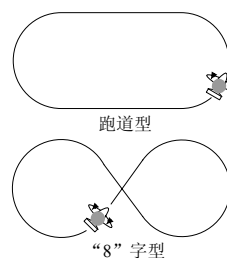


图 1 空域巡逻航线示意图

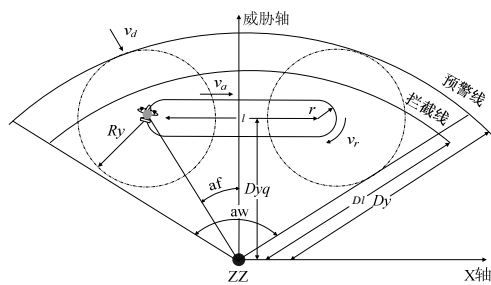


图 2 空域巡逻航线提供的预警扇区示意图

2 跑道型巡逻航线的预警空域

为了保证截击目标的反应时间, 希望预警机在最大探测距离上发现目标。当然, 目标进入预警空域是随机的, 预警机巡逻过程中, 对于不同方向和速度突防的目标发现时机有差别。所以, 设置巡逻

收稿日期: 2010-09-13

作者简介: 贾临生 (1978-), 男, 工程师, 硕士生; 吴文海 (1962-), 男, 教授, 博导, 大学。

航线的参数应该保证在尽可能远的距离上完成对目标的探测识别。那么，预警机的巡逻航线应在拦截线的内侧，并且留有一定的安全缓冲地带^[6]。如图3中的ON线称为发现近界，距离预警机的巡逻航线为B km。

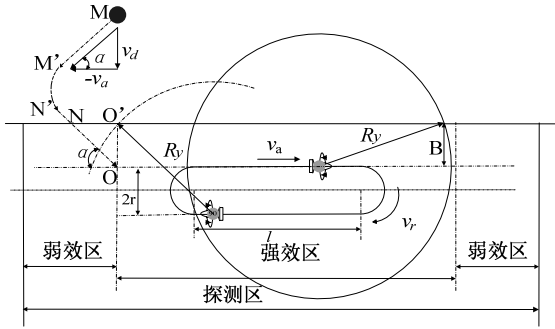


图3 跑道型巡逻航线的探测区域示意图

2.1 强效区

假定目标M来袭方向垂直于巡逻航线，径向飞行速度 v_d ；预警机的直线巡逻速度为 v_a ，转弯半径 r ，转弯速度 v_r ；（对于突防高度和RCS一定的目标）雷达探测距离为 R_y 。根据图3中的相对运动关系，预警机从左向右飞行时，来袭目标相对于预警机沿 MM' 线运动，目标接近 M' 点时，预警机按照预定航线以半径 r 回转，回转过程中目标的相对轨迹近似为弧 $\widehat{MN'}$ ；预警机向左飞行时，目标相对于预警机将沿 NN' 线运动。实际上，目标到达发现近界上的 O' 点时被预警机发现，而相对运动轨迹与发现近界的交点为 N 。得到预警机的探测区宽度为：

$$widf = l + 2\sqrt{R_y^2 - (B+r)^2} \quad (1)$$

突防目标均能在发现近界前被探测到的区域称为强效区，理论上认为漏警率为零；强效区的两侧各有一个弱效区，探测空域有限，覆盖时间短，发现目标的概率小，甚至出现漏警。

极端情况下， M 点来袭的目标处于强效区的边界，预警机在一个巡逻周期内，于发现近界上 O' 点探测到以速度 v_d 来袭的目标，而目标的相对运动轨迹与发现近界在 N 点相交，由此可以得出预警机巡逻边长 l 的公式：

$$l = (R_y / \tan \alpha - v_a \cdot \pi \cdot r / v_r) / 2, \quad (2)$$

式中， $\alpha = \arctan(v_d/v_a)$ 。

未能完成一个巡逻周期的预警机在发现近界的 O' 点探测到从强效区边界来袭的目标，而目标的相

对运动轨迹与发现近界在 N 点相交，显然，线段 ON 的长度属于预警机在一个巡逻周期内应该完成的航程，这样设置巡逻航线可以保证强效区内突防的目标可以在发现近界前被探测识别。根据图中的相对运动关系得到强效区宽度：

$$widq = l + 2\left[\sqrt{R_y^2 - (B+2r)^2} - B/\tan \alpha\right], \quad (3)$$

式中， $\alpha = \arctan(v_d/v_a)$ 。

可以看出：目标与预警机的相对速度大小影响到巡逻边长和强效区的宽度。来袭目标的速度快，通过探测区的时间短，那么预警机的巡逻航线不能太长，强效区自然会减小。

2.2 弱效区

在弱效区，预警机对于目标的探测时间和空间都有限，可能无法发现目标。当然，漏警的因素很多^[7]，但根本在于探测空域的覆盖概率和有效探测时间。在此，基于SEA的基本原理，将时间和空间因素统一考虑，讨论弱效区的预警效能。

2.2.1 SEA方法

SEA方法有6个概念：系统，使命，环境，原始参数，性能量度和系统效能。系统是相互关联的部分协同动作的有机整体；使命是系统必须完成的任务；环境是与系统发生作用而又不属于系统的元素的集合；原始参数是描述系统、环境及使命的独立变量；性能量度是描述系统完成使命的能力；系统效能指在一定环境下，系统能够完成规定使命的程度，用 E 表示。

$$s = (s_1, s_2, \dots, s_k), \quad c = (c_1, c_2, \dots, c_i),$$

$g = (g_1, g_2, \dots, g_j)$ 分别表示由所有系统原始参数、环境原始参数、使命原始参数组成的向量。

R^n 表示 n 维欧氏空间，值域 $S \subset R^k$ 、 $C \subset R^l$ 、 $G \subset R^j$ 。令 R^m 为 m 维性能量度空间{MOP}（欧氏空间）。

建立非线性且非一一对应的映射： $f_s : (S, C) \rightarrow R^m$ ，称为系统映射。定义值集： $L_s = \{m_s = f_s(s, c) : s \in S\}$ ， $c \in C$ 称为系统轨迹，是 s 在 S 中变化时，性能量度空间上形成的轨迹。

建立映射： $f_m : (G, C) \rightarrow R^m$ ，称为使命映射。定义值集： $L_m = \{m_m = f_m(g, c) : g \in G\}$ ， $c \in C$ 称为使命轨迹，是 g 在 G 中变化时，在{MOP}空间上形成的轨迹。

性能量度：当 $m_s \in L_m$ 时，系统在 s 状态下可完

成使命；当 $m_s \notin L_m$ 时，系统在 s 状态下不能完成使命。 s 的取值是随机的，系统轨迹落入使命轨迹内的点（集）出现的概率大小就反映了系统完成使命的可能性。 \bar{V} 表示 R^m 空间测度，则系统效能为 $E = \bar{V}(L_s \cap L_m) / \bar{V}(L_s)^{[8-9]}$ 。

根据上文的讨论，在强效区两侧各有一个弱效区，距离探测区外边界 d km 的目标以速度 v_d 垂直于巡逻航线突防。为了评估预警机在弱效区的效能，选定的 MOP 集合必须有明确的物理意义。为了发现识别目标，预警机应该完成两项任务：定义 MOP1 为预警机对弱效区空域的探测概率，MOP2 为预警机在弱效区一定空域的覆盖时间。

2.2.2 系统映射

$$P_{\text{warn}} = \frac{P2P0 - P1P0}{P2P0} = 1 - \frac{\pi \cdot r \cdot v_d / v_r + \left[l + r + \sqrt{R_y^2 - B^2} - \sqrt{R_y^2 - (B + 2r)^2} - d \right] v_d / v_r}{2 \cdot (\pi \cdot r / v_r + l / v_a) \cdot v_d}, \quad (4)$$

$$0 \leq d < r + B / \tan \alpha + \sqrt{R_y^2 - B^2} - \sqrt{R_y^2 - (B + 2r)^2}.$$

根据巡逻边长与相对速度比的关系，相对速度比不同，巡逻边长 l 和 d 的取值范围也不同。通过式(4)可以得到 MOP1 的计算方法，分析对于从弱效区某个方向（距离探测区边界 d km）突防的不同速度目标，采用空域巡逻航线的预警机的探测概率。

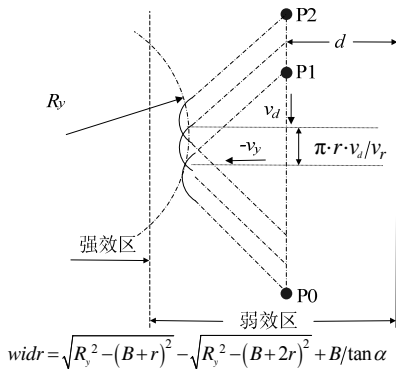


图4 空域巡逻的弱效区探测概率

整个弱效区空域可以看做是以速度 v_d 突防的目标流，由于预警机在一个巡逻周期内对于弱效区的探测空域有限，所以，不一定能够探测到弱效区空域的所有目标。

如图4所示，在一个巡逻周期内，距离探测区外边界 d km 的目标以速度 v_d 可以从 P2 点前进到 P0 点，线段 P2P0 可以代表不同时刻从这个方向上突防的目标流，预警机从左向右飞行的半个周期可以探测右边的弱效区，处于 P1 点以后的目标流相对运动曲线与探测区域不会相交，即不可能被探测，可以得到距离探测区外边界 d km 来袭目标落入预警机探测区域的概率：

MOP2 为预警机在弱效区一定空域的覆盖时间，是从弱效区某个方向突防的目标在预警机雷达覆盖范围内逗留的时间，用 T_d 表示。图5为弱效区一定空域的覆盖时间。

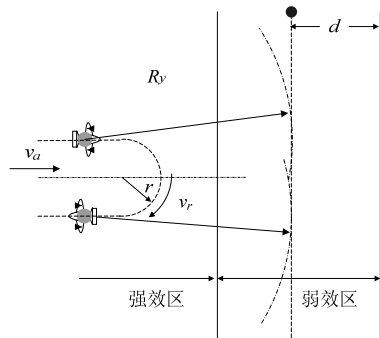


图5 弱效区一定空域的覆盖时间

如图5所示，就是预警机雷达的探测圆进入直至离开指定空域的时间，可以得到：

$$T_d = 2 \cdot \left(R_y + d - r - \sqrt{R_y^2 - B^2} \right) / v_a + \pi \cdot r / v_r, \quad 0 \leq d < r + B / \tan \alpha + \sqrt{R_y^2 - B^2} - \sqrt{R_y^2 - (B + 2r)^2}, \quad \tan \alpha = \frac{v_d}{v_a}. \quad (5)$$

式(5)决定了 MOP2 的计算方法。

2.2.3 使命映射

根据作战需要^[10]，对于弱效区空域需要一定的探测概率，决定 MOP1 的范围为 $(P_{\text{min}}, 1)$ ， P_{min} 为

作战使命中对弱效区空域的最小探测概率要求。预警机发现的目标能够被成功拦截的前提是有效地截获和识别目标，需要雷达及辅助设备花费一定的判断时间，判定目标属性之后向指挥部门告警及引导战斗机进行拦截，其中情报共享及下达指令也需要

一定的时间，如果目标在预警机雷达覆盖范围内滞留时间过短，预警机一样会对目标产生漏警。根据装备性能得出一个预警机必须提供的最小覆盖时间 t_{\min} 。预警机提供的覆盖时间大于 t_{\min} 的前提下，可以确认目标，战斗机在弱效区空域可能以一定的概率拦截目标，使命映射的 MOP2 范围为 $(t_{\min}, +\infty)$ 。

2.2.4 效能计算

以 v_a 、 v_d 、 R_y 、 l 、 r 、 B 、 d 、 T_d 等作为原始参数，根据以上对系统映射和使命映射的分析，由于 MOP1 和 MOP2 在各自范围内均匀分布，所以：

$$\bar{V}(L_S) = [\max(P_{warn}) - \min(P_{warn})][\max(T_d) - \min(T_d)]。$$

若 $L_S \cap L_m$ 不为空，则 $\bar{V}(L_S \cap L_m)$ 为 MOP1 和 MOP2 在系统映射和使命映射空间内交集范围的乘积。MOP1 和 MOP2 是均匀分布的，预警机在弱效区空域的预警效能：

$$E = P(P_{warn} > P_{\min})P(T_d > t_{\min})。$$

3 算例分析

结合上述分析，本节针对空域巡逻航线的预警空域进行简要的定量分析^[1]。（对于高度和 RCS 一定的目标）预警雷达探测距离 $R_y = 400$ km，空域巡逻航线的转弯半径 $r = 5$ km，预警机巡航速度 $v_a = v_r = 500$ km/h，目标速度 $v_d \approx 250 \sim 4\ 000$ km/h。

3.1 关于强效区航线设置的分析

设定发现近界 $B = 80$ km，根据式(1)、(3)，得到巡逻边长、强效区宽度与相对速度比的仿真结果如图 6 所示。

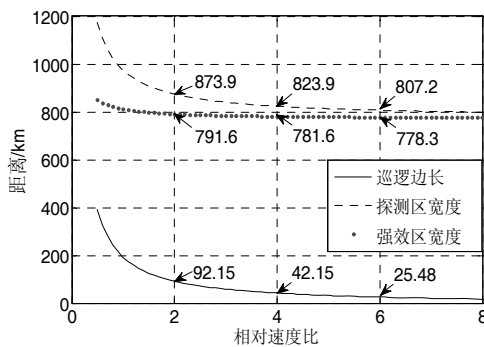


图 6 巡逻边长、强效区及探测区宽度与相对速度比的仿真

当预警机的性能 (R_y) 一定时，预警机的探测范围和巡逻边长主要与相对速度比有关。可以看出，随着相对速度比的增大，即目标速度越大时，巡逻边长、探测区宽度和强效区宽度都在减小。对于低

速目标可以采用较长的巡逻边长，形成相当大的强效区；对于高速目标，巡逻边长迅速减小，相应的强效区宽度也显示出同样的变化；目标的径向速度 v_d 达到预警机巡逻速度 v_a 的 6 倍 (3 000 km/h)，巡逻边长、强效区及探测区的宽度变化不大，强效区和探测区趋于一致，弱效区基本上不存在了。所以，确定预警机的巡逻边长时，应该注意不同任务环境下目标的特点，合理取舍，讲求效率。

突防目标速度 v_d 分别取 500 km/h、2000 km/h，根据式(1)巡逻边长 l 分别为 192.1 km 和 42.15 km，如果发现近界 $B \approx 0 \sim 60$ km，根据式(3)得到强效区及探测区宽度与发现近界的仿真曲线如图 7 所示。

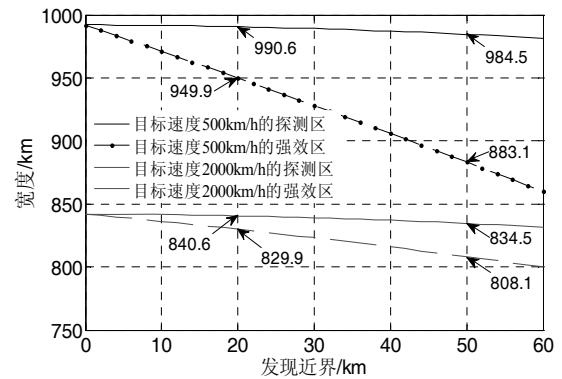


图 7 探测区及强效区宽度与发现近界的仿真

可以看出：对于一定速度的目标，发现近界越大，强效区及探测区宽度在减小。根据发现近界的概念，影响取值的主要因素是目标的打击能力及己方的性能。因此，确定发现近界时既不能为了提高探测范围而随意缩小，又不能一味提高发现近界而降低预警机在强效区的预警能力。

3.2 关于弱效区预警效能的分析

设定发现近界 $B = 80$ km，不同相对速度比对应 d （弱效区来袭目标距离探测区边界的大小）的取值范围不同，根据式(3)、(4)可以得到巡逻边长 l 、 d 的取值范围与相对速度比的关系。

根据式(3)~(5)如果弱效区某个方向（距离探测区边界 d km）的目标速度一定，那么预警机的预警效能一定。相对速度比分别取 1、2、3、4，来袭目标 $v_d \approx 500 \sim 2\ 000$ km/h，弱效区预警效能仿真曲线如图 8 所示。图中 4 条曲线分别代表了采用跑道型巡逻航线的预警机对于弱效区一定方向（距离探测区边界 d km）不同速度 ($v_d \approx 500$ km/h、1 000 km/h、1 500 km/h、2 000 km/h) 的突防目标的预警效能，

预警机与目标的相对速度比不同,需要的巡逻边长不同,形成的弱效区宽度也不同,每条曲线端点的横坐标就是弱效区的宽度。从图中可以看出:预警机对于速度慢、距离探测区边界远的目标预警效能强。显然,对于一定速度的目标,距离探测区边界远也就是距离强效区近,被预警机发现的概率增大;对弱效区一定方向的目标,速度快突防时间短,预警机很难有充足时间进行探测识别,预警效能必然减小。

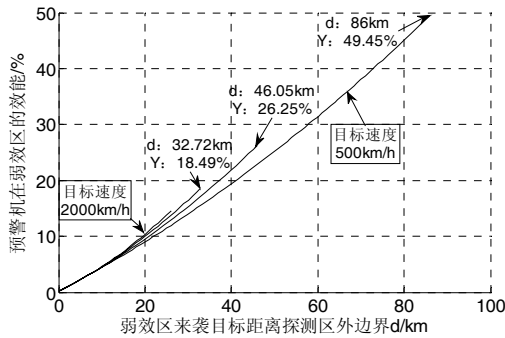


图8 弱效区预警效能的仿真

4 结论

本文说明了固定翼预警机空域巡逻航线的特点和适用环境,研究空域巡逻航线的预警空域,讨论了影响预警空域强效区的因素,分析了弱效区的预警效能,为预警机的战术使用提供参考。结合算例说明了巡逻航线的设置对于强效区的影响,定量分析了弱效区的预警效能,清楚直观地介绍了预警机的航线规划需要注意的问题。

参考文献:

- [1] IAN MOIR, ALLAN SEABRIDGE. Military Avionics Systems[M]. USA: John Wiley, 2003:35-36.
- [2] 胡剑文, 张维明, 刘忠. 复杂系统理论及其对作战实践的指导研究[J]. 火力与指挥控制, 2004,29(2):68-71.
- [3] 郭齐胜. 装备效能评估概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005:49-52.
- [4] 郇能敬. 预警机系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998:38-39.
- [5] 朱丽莉, 冯存前, 张永顺. 预警机系统关键技术分析[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005,27(2):67-70.
- [6] 曹晨. 预警机——信息化战争的空中帅府[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009:157-158.
- [7] 星学华, 陈浩光, 姜浩, 等. 区域防空侦察预警系统效能模型[J]. 兵工自动化, 2007,26(8):13-14.
- [8] PHILIPPE J F MARTIN, LEVIS A H. Measures of effectiveness and C3 testbed experiments[R]. LIDS-P-1678, 1987:412-419.
- [9] COTHIER P H. Timeliness and measures of effectiveness in command and control[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1986,6(6):844-853.
- [10] 陈浩, 雷英杰. 基于 SEA 的预警机低空预警效能分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007,8(2): 10-13.
- [11] 宋叶志, 贾东永. MATLAB 数值分析与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009:47-53.

Analysis on Early Warning Airspace of Airspace Patrolling Route Adopted by Foreign Airborne Early Warning Airplanes

JIA Lin-sheng¹, WU Wen-hai¹, GAO Wei¹, WANG Jun-yan²

(1. Qingdao Branch of NAAU, Qingdao Shandong 266041, China;
2. The 92635th Unit of PLA, Qingdao Shandong 266041, China)

Abstract: Firstly, the battlefield surroundings were discussed which was applied to airspace patrolling route. Then, the early warning airspace and efficiency of the route were introduced. At the same time, based on fundamental method of SEA, the problem of detection effectiveness of AEW in low detection airspace was described. At last, some factors which may influence early warning airspace and efficiency were analyzed by examples. It may provide references for tactical application of airborne early warning airplanes.

Key words: airborne early warning airplane (AEW); tactical application; system effectiveness analysis (SEA); system mapping; mission mapping; air defense early warning