

文章编号: 100026893(2006)052089204

# 预警飞机任务效能数学模型研究

孙宇锋<sup>1</sup>, 王 昱<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

(2 清华大学 软件学院, 北京 100084)

Study on a Mission Effectiveness Model of Early Warning Airplane

SUN Yu2feng<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>

(1 Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2 School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘 要: 研究建立实战条件下武器系统可靠性维修性保障性因素综合评价模型,对武器系统可靠性维修性保障性参数指标论证过程中简化分析和减少对仿真技术的使用具有实用意义。通过研究和分析实战条件下的预警飞机使用状况,利用概率方法建立了其作战条件下的任务效能数学模型,为利用解析法进行预警飞机可靠性维修性保障性指标论证提供了可行手段和重要模型,为定量评价可靠性维修性保障性因素对预警飞机作战影响奠定了基础。

关键词: 任务效能; 系统效能; 任务效能模型; 预警飞机; 指标论证

中图分类号: TB114.3 文献标识码: A

Abstract: To research and establish the general evaluation model of Reliability, Maintainability and Supportability (RMS) factors for the weapon system in condition of consideration operation is valuable for the simplified analysis and reduced application of simulation technique in the course of RMS requirement determination. Upon the base of analyzing the usage of early warning airplane in operational environment, its mathematical mission effectiveness model for operational condition is established in term of probability principles. This work provides the facility and model for determinating the RMS indexes of early warning airplane by using analysis method, and gives a theoretical basis for the quantitative evaluation of RMS factors effect on the operation of early warning airplane.

Key words: mission effectiveness; system effectiveness; mission effectiveness model; early warning airplane; RMS indexes determination

预警飞机<sup>[1]</sup>是用于进行搜索、监视和跟踪空中和海上目标的作战支援飞机。同其他作战飞机类似,其可靠性、维修性、保障性指标的论证往往也可采用仿真方法进行,但必须建立相应的可靠性、维修性、保障性指标论证的仿真环境,需要耗费相当的人力、物力和时间。因此研究预警飞机可靠性、维修性、保障性因素的综合评价数学模型,对简化其可靠性、维修性和保障性指标论证的分析工作、避免开发仿真环境或建立复杂仿真模型、降低论证工作对技术和工具的要求具有重要实用价值。

## 1 系统效能与任务效能

武器系统效能就是该系统在规定的条件下满足给定定量特征和服务要求的能力,它是系统可用性、可信性及固有能力的综合反映<sup>[2]</sup>。常见的评定系统效能的模型是美国工业界武器系统效能

咨询委员会 (WSEIAC) 给出的模型<sup>[3]</sup>

$$E = A \# D \# C \quad (1)$$

式中: E 为系统效能; A 为可用度向量; D 为可信度矩阵; C 为能力矩阵(向量)。

上述系统效能模型中, A 和 D 是武器系统的可靠性、维修性和连续工作能力的度量, C 是对武器系统在作战期间完成作战任务的能力的度量,也是求解效能的关键之一,而通常测定和预测一个复杂的武器系统的能力是一个非常困难的问题。在实际应用中,当仅需要考察可靠性、维修性和保障性 3 方面因素对作战任务的影响,不考虑系统能力因素的影响时,可以对上述 WSEIAC 系统效能模型进行简化,去掉能力矩阵 C,得到武器系统的任务效能。该参数是综合评价和分析武器系统可靠性、维修性、保障性因素的重要顶层参数。

武器系统的任务效能是指系统可以开始执行任务而且开始后能够完成任务的概率<sup>[4]</sup>。即考虑

到了武器系统在任务开始时的可用度与其在规定任务过程中的可信度。在美国空军指令文件 AFI 102602<sup>[4]</sup>中,它的定义为

$$E_M = A_0 D_0 \quad (2)$$

式中:  $E_M$  为任务效能;  $A_0$  为使用可用度;  $D_0$  为使用可信度。

## 2 作战基本假设

从过去对武器系统效能模型及任务效能模型的研究<sup>[27]</sup>来看,通常是将武器系统执行单次任务的平均状况作为其使用背景,没有更详细考虑武器系统实际使用条件的细节以及实战条件下对武器系统持续作战能力的要求,因此具有较大的局限性。为获得更接近实战条件、更准确的任务效能模型,研究中规定了以下预警飞机作战基本假设:

(1) 一个基本作战单位(或飞行中队)在一个较长时期内不间断的、持续对某一固定地域执行预警任务,且任务仅需一架飞机就可完成。

(2) 飞机每架次执行任务过程分为3个阶段:地面准备并起飞到达任务空域的阶段、预警和巡逻阶段、返航阶段。

(3) 执行任务时预警机交接班为理想状态,即正在执行任务飞机准备返航时,接班飞机正好到达任务空域。

(4) 在预警机执行任务过程中会发生各类故障,并可能造成任务的暂时中断。在执行任务期间不能进行故障修复,当飞机在空中发生致命性故障(即不能继续执行任务)后,需立即返航并可以安全回到基地。

(5) 按照作战飞机的使用原则,作战单位中所有预警飞机需要轮流执行作战任务,预警机出动的顺序与飞机的故障状况、维修状况及地面的保障能力有关。

(6) 不计飞机定检、天气因素的影响。

## 3 使用可用度模型

使用可用度表示武器系统可以工作并随时可以开始执行任务的概率。作战飞机的可用性评价参数最常用的为使用可用度( $A_0$ )、能执行任务率(MCR)和出动架次率(SGR)。对处于论证阶段的作战飞机,使用可用度  $A_0$  通常可以表示为

$$A_0 = \frac{MTBM + RT}{MTBM + RT + MDT} \quad (3)$$

式中:  $MTBM$  为飞机平均维修间隔时间;  $RT$  为

飞机待命时间;  $MDT$  为飞机平均不能工作时间,包括修复性维修、预防性维修以及保障与管理造成的不能工作时间。

上式中不含常用 RMS 参数,不便于应用,可通过变换<sup>[8]</sup>表示为

$$A_0 = 1 -$$

$$\frac{MTTR + K_P T_{PM} \# MTBF + MLDT \# K_d (1 + K_P MTBF)}{MTBF \# K} \quad (4)$$

式中:  $MLDT$  为平均保障延误时间;  $MTBF$  为飞机平均故障间隔时间;  $MTTR$  为飞机平均修复时间;  $K$  为运行系数,是系统总日历时间与总工作时间之比;  $K_P$  为预防性维修频数,是预防性维修次数和工作时间之比;  $K_d$  为维修延误系数,是延误次数和总维修次数之比;  $T_{PM}$  为平均预防性维修时间。  $K_P$ ,  $K_d$ ,  $K$  和  $T_{PM}$  均是与使用和维修有关的参数,需要参考相似机型数据或依据部队外场使用经验推算获得,  $MLDT$  还是与使用保障有关的参数,可依经验或按文献[8]中给出的方法估算。

根据前面规定的预警飞机作战基本假设,设一个基本作战单位共有  $n$  架预警飞机,执行每一架次飞行任务时地面有  $m$  架飞机同时进行准备,若单架预警飞机的使用可用度为  $A_0$ ,则整个基本作战单位预警飞机的使用可用度  $A_{0s}$  为

$$A_{0s} = 1 - (1 - A_0)^m = 1 - \left( \frac{MTTR + K_P T_{PM} \# MTBF + MLDT \# K_d (1 + K_P MTBF)}{MTBF \# K} \right)^m \quad (5)$$

## 4 使用可信度模型

使用可信度表示武器系统在任务剖面内在任何给定时刻可以工作并完成各项所需功能的概率。一般使用可信度  $D_0$  可以表示为

$$D_0 = R_M + (1 - R_M) \# M_M \quad (6)$$

式中:  $R_M$  为任务可靠度;  $M_M$  为任务维修度。

预警飞机在任务期间通常不能进行故障修复,因而其最常用的可信性评价参数为任务可靠度,但对于长时间执行任务的作战飞机而言,文献[9]认为使用  $R_M$  评价其可信性则过于简略、不够精确。因此针对预警飞机需要长时间不间断执行预警任务的要求,本文提出使用/任务有效系数  $B_0$  参数来评价预警飞机的可信性。

任务有效系数  $B_0$  的定义为

$$B_0 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m t_{mi} \quad (7)$$

式中:  $m, T$  为在规定日历时间内的出动架次总数和总任务时间;  $t_{mi}$  为每架次有效任务时间, 是指在每架次飞行中仅用于执行预警和巡逻任务的时间, 不包括飞机起飞到达任务空域时间和返航时间。

在任务执行过程中, 致命性故障的发生会使预警任务暂时中断(由于按计划飞行的接班飞机不能及时到达巡逻空域), 因而上式又可以表示为

$$B_n = \frac{\overline{t_m}}{t_m + t_d} \quad (8)$$

式中:  $t_d$  为每架次平均任务中断时间;  $\overline{t_m}$  为每架次平均有效任务时间。

根据前述的作战基本假设, 设预警机进行地面准备并起飞到达巡逻空域的时间为  $t_1$ , 执行预警任务时间为  $t_2$ , 预警机在执行任务期间出现致命性故障的规律符合 Poisson 分布, 其平均致命性故障间隔时间为  $MTBCF$ , 则在任务时间  $t$  发生致命性故障的概率为

$$P(t) = (1 - e^{-t/MTBCF}) \quad (9)$$

致命性故障可能发生在出航、预警和返航阶段, 相应各阶段的有效任务时间  $t_m$  分别为  $0, (t - t_1)$  和  $t_2$ , 则平均有效任务时间

$$\begin{aligned} \overline{t_m} &= \int_0^{t_1+t_2} t_m dP = \int_0^{t_1+t_2} (dP/dt) t_m dt = \\ &= \frac{1}{MTBCF} \left[ \int_{t_1}^{t_1+t_2} Q^{t/MTBCF} (t - t_1) dt + \int_{t_1+t_2}^{+\infty} Q^{t/MTBCF} t_2 dt \right] = \\ &= MTBCF [e^{-t_1/MTBCF} - e^{-(t_1+t_2)/MTBCF}] \quad (10) \end{aligned}$$

注: 式中由于故障发生概率为 1 时对应的的时间是无限大, 所以时间积分要相应算到无限大。

图 1 给出了致命性故障可能发生的时间区段, 表 1 给出了致命性故障发生区段与相应的任务中断时间的关系。

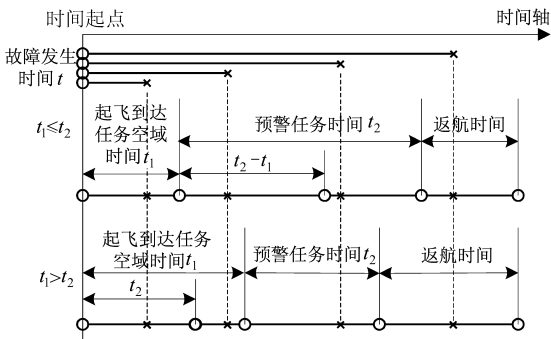


图 1 故障发生区段的分布图

Fig 1 Time intervals of failure occurrence

表 1 故障区段与任务中断时间的关系

Table 1 The relation between failure occur and task break time

故障发生区段	任务中断时间	接班飞机状态
$(0, t_1)$	$T$	还未起飞
$t_2 \setminus t_1$	$t_1$	已经起飞
$(t_2, t_1 + t_2)$	$(t_1 + t_2 - t)$	完成接班
$(t_1 + t_2, ])$	$0$	完成接班
$(0, t_2)$	$T$	还未起飞
$t_1 < t_2$	$t_2$	已经起飞
$(t_1, t_1 + t_2)$	$(t_1 + t_2 - t)$	完成接班
$(t_1 + t_2, ])$	$0$	完成接班

当  $t_2 \setminus t_1$ , 平均任务中断时间为

$$\begin{aligned} \overline{t_d} &= \int_0^{t_1+t_2} t dP = \int_0^{t_1+t_2} (dP/dt) t_d dt = \\ &= \frac{1}{MTBCF} \left[ \int_0^{t_1} Q^{t/MTBCF} t dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} Q^{t/MTBCF} t_1 dt + \int_{t_1+t_2}^{+\infty} Q^{t/MTBCF} (t_1 + t_2 - t) dt \right] = MTBCF \# \\ &= [1 - e^{-t_1/MTBCF} - e^{-t_2/MTBCF} + e^{-(t_1+t_2)/MTBCF}] \quad (11) \end{aligned}$$

当  $t_1 < t_2$ , 平均任务中断时间为

$$\begin{aligned} \overline{t_d} &= \int_0^{t_1+t_2} t dP = \int_0^{t_1+t_2} (dP/dt) t_d dt = \\ &= \frac{1}{MTBCF} \left[ \int_0^{t_2} Q^{t/MTBCF} t dt + \int_{t_2}^{t_1} Q^{t/MTBCF} t_2 dt + \int_{t_1+t_2}^{+\infty} Q^{t/MTBCF} (t_1 + t_2 - t) dt \right] = MTBCF \# \\ &= [1 - e^{-t_1/MTBCF} - e^{-t_2/MTBCF} + e^{-(t_1+t_2)/MTBCF}] \quad (12) \end{aligned}$$

即无论  $t_1$  和  $t_2$  间的关系如何, 得到相同的平均任务中断时间表达式。将式(10)、式(11)或式(12)带入式(8), 得到任务有效系数

$$B_n = \frac{e^{-t_1/MTBCF} - e^{-(t_1+t_2)/MTBCF}}{1 - e^{-t_2/MTBCF}} \quad (13)$$

将任务有效系数  $B_n$  代替使用可信度, 则在考虑连续作战条件下, 整个基本作战单位预警飞机的使用可信度为

$$D_0 = \frac{e^{-t_1/MTBCF} - e^{-(t_1+t_2)/MTBCF}}{1 - e^{-t_2/MTBCF}} \quad (14)$$

### 5 任务效能模型

将式(5)、式(14)带入式(2), 得到连续作战条件下, 整个基本作战单位预警飞机的任务效能的

表达式

$$E_M = \left[ 1 - \left( \frac{MTTR + MLDI \cdot K_d (1 + K_P MTBF)}{MTBF \cdot K} \right)^m \right] \cdot \left[ \frac{e^{-t_1/MTBCF} - e^{-(t_1+t_2)/MTBCF}}{1 - e^{-t_2/MTBCF}} \right] \quad (15)$$

预警飞机任务效能模型中包含了基本可靠性参数、任务可靠性参数、维修性参数、保障性参数和任务剖面中的主要时间参数,利用该数学模型,使用解析法就可对预警飞机主要可靠性、维修性、保障性指标进行综合权衡和论证,简化了其可靠性、维修性和保障性指标论证的分析工作,降低了论证工作对技术和工具的要求。

### 6 结 论

研究建立的预警飞机任务效能数学模型考虑了基本可靠性、任务可靠性、维修性、保障性和任务剖面等综合因素的影响,为利用解析手段论证与综合权衡预警飞机可靠性、维修性、保障性指标提供了可行手段,为定量评价实战条件下预警飞机系统效能提供了依据,该模型的建立避免了开发预警飞机可靠性、维修性及保障性指标论证仿真环境或建立复杂仿真模型,对简化论证分析工作和降低论证工作技术难度具有工程实用意义。

### 参 考 文 献

[1] 郦能敬. 预警机系统导论[M]. 北京:国防工业出版社, 1998: 210.  
Li N J. Early warning airplane introduction[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 210. (in Chinese)

[2] GJB451290. 可靠性维修性术语[S]. 1990.  
GJB451290. Reliability and maintainability terms[S]. 1990. (in Chinese)

[3] Flaathen K O. A methodology to find overall system effe2

tiveness in a multicriterion environment using surface to air missile weapon systems as an example[R]. ADA109549, 1981.

[4] Air Force Instruction 102602. Determining logistics support and readiness requirements[S]. 1994.

[5] Air Force Instruction 102601. Mission needs and operational requirements guidance and procedures[S]. 1998.

[6] 高尚, 娄寿春. 武器系统评定方法综述[J]. 系统工程理论与实践, 1998 (7): 1092114.  
Gao S. Lou S C. Progress in assessing effectiveness of weapon system [J]. Acta Mathematica Sinica, 1998 (7): 1092114. (in Chinese)

[7] Price B C. Achieving a system operational availability requirement (ASOAR) model methodology [R]. ADA262406, 1991.

[8] 杨云. 军用飞机 RMS 要求论证指南[R]. 科技报告 RMSDE GUI201, 北京: 空军装备总体论证研究所, 2005.  
Yang Y. RMS requirement determination of operational aircraft [R]. RMSDE GUI201, Beijing: Institute of Air Equipment Determination, 2005. (in Chinese)

[9] 朱宝鏊. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.  
Zhu B L. Operational aircraft effectiveness assessment [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993. (in Chinese)

作者简介:



孙宇锋(1969- ) 男,山西大同人,北京航空航天大学工程系统工程系副教授,博士。主要研究方向:系统可靠性仿真、功能可靠性仿真、性能和可靠性一体化设计、可靠性软件开发等。E2mail: syf@buaa.edu.cn; 联系电话: 82316447。

王 昱(1974- ) 男,江苏南京人,博士,空军装备部科研订货部参谋,2003年毕业于北京航空航天大学飞行器设计专业,现为清华大学软件学院博士后。

(责任编辑:李铁柏)