

基于作战效能的军用飞机维修与保障

何宇廷¹, 张 腾^{1,2}, 崔荣洪¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 94354 部队, 山东嘉祥, 272412)

摘要 与民用飞机相比, 军用飞机的维修与保障始终是以恢复、保持和提高作战效能为根本目的, 并在此基础上寻求最佳的经济性。从作战效能的定义出发, 建立了作战效能的广义模型; 而后, 提出了基于作战效能的维修与保障的概念, 阐述了基于作战效能的维修与保障内涵, 给出了基于作战效能的维修与保障实施流程, 并进行了举例说明; 最后, 针对基于作战效能的维修与保障的几个关键问题进行了探讨。通过实施基于作战效能的维修与保障, 可以将作战效能与维修保障活动的关系通过数学模型进行量化, 从而优化维修与保障活动, 实现军用飞机作战效能的最大化。

关键词 军用飞机; 作战效能; 维修; 保障

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.01.001

中图分类号 V37 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)01-0001-06

Maintenance and Support for Military Aircraft Based on the Combat Effectiveness

HE Yuting¹, ZHANG Teng^{1,2}, CUI Ronghong¹

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Unit 94354, Jiexiang 272412, Shandong, China)

Abstract: Compared with the civil aircraft, the restoring, maintaining and improving based on the combat effectiveness must always be taken as the fundamental purpose, and simultaneously, the seeking for the best economy must also be taken into consideration in the whole process of the maintenance and the support for the military aircraft. In this paper, a generalized model of combat effectiveness is established firstly based on the definition of combat effectiveness, and a concept named Combat Effectiveness Based Maintenance and Support (CEBM&S) is put forward. The connotation of the CEBM&S is expounded, and an application process of the CEBM&S is proposed, and an example is given. Finally, there are two key problems of the CEBM&S to be discussed. By applying the CEBM&S, the relationship between the combat effectiveness and the maintenance & support activities can be quantified by a mathematical model, and then the combat effectiveness can be maximized by optimizing the maintenance and support process.

Key words: military aircraft; combat effectiveness; maintenance; support

设备/装备的维修与保障包含 3 个方面的工作内容: 一是维护, 以维持设备/装备性能、预防故障、检查发现故障(或隐患)等为主要目的; 二是修理, 以

恢复或部分恢复设备/装备的功能等为主要目的; 三是保障(这里指狭义的保障概念), 以提供作业场所、器材和备件、补充消耗等为主要内容。

收稿日期: 2018-01-29

作者简介: 何宇廷(1966—), 男, 四川阆中人, 教授, 博士生导师, 主要从事飞机结构强度与使用寿命研究。E-mail: heyut666@126.com

引用格式: 何宇廷, 张腾, 崔荣洪. 基于作战效能的军用飞机维修与保障[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(1): 1-6. HE Yuting, ZHANG Teng, CUI Ronghong. Maintenance and Support for Military Aircraft Based on the Combat Effectiveness[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 1-6.

在市场经济中,围绕民用产品的一切活动以盈利为根本目的,其强调的根本目标是经济性最优化,并以此为牵引确定产品的全寿命周期维修与保障策略,从而在降低全寿命周期维修费用的同时增加运营时间、提高收益^[1]。目前,正在推行的以可靠性为中心的维修^[2]、基于状态的维修^[3]、预测维修^[4]等维修思想,最终也是以实现经济性的最大化为根本目的。例如,民用飞机在大修时,需要计算大修停机费、大修消耗、大修工时、停机任务损失等等,从而在一定的维修质量要求下,根据投入与产出进行最优的修理方案设计和修理程度确定,以达到经济性最优。这就是典型的“基于经济性的维修”,这种做法已在民用领域产生了巨大的经济效益。对于民用飞机而言,运营的安全性与正点率是基本要求,也会直接影响到航空公司的经济效益。

对于军用飞机而言,不论是平时的维修与保障还是战时的维修与保障(包括战伤抢修等),其目的都是首先恢复、保持和提升飞机的作战能力(或称为战斗力),在此基础上再寻求经济性的最优化。作战效能是对飞机作战能力的定量化表征^[5],从平战结合或面向实战的角度来看,以作战效能为衡量标准,可以充分地反映军用飞机使用维修与保障的综合效果。

为此,本文提出了基于作战效能的维修与保障的概念,阐述了基于作战效能的维修与保障内涵,建立了基于作战效能的维修与保障实施流程,并对基于作战效能的维修与保障的几个关键问题进行了探讨。

1 基于作战效能的维修与保障概念

1.1 作战效能的概念与广义模型

军用飞机的作战效能是指军用飞机完成预定作战任务的能力^[6]。这里所说的“作战效能”指的是飞机的系统效能(或称为综合效能),描述的是飞机完成其作战任务的总体能力,不仅包括飞机固有作战性能的大小,还包括可靠性、维修性、保障性和生存力等因素。可以说,军用飞机的作战效能是其战斗力的综合量化指标。

目前,最广泛应用的系统效能模型是美国空军的ADC模型^[7-8],其将可靠性、维修性、保障性、生存力和固有能力强因素综合为可用性、可信性和固有能力强3个指标,并认为系统效能是这3个指标的进一步综合,表达式为:

$$E=ADC \quad (1)$$

式中: E 是系统效能; A 是可用性向量,是在某一随机时刻要求完成任务时,系统在任务开始时处于能

工作或可使用状态的度量; D 是可信性矩阵,是在任务开始时在给定的可用度下,在规定的任务剖面中的任一时刻,系统可工作并能够完成其规定功能的度量; C 是固有能力强矩阵,是系统在任务期间内所给定的条件下完成任务能力的度量。

式(1)是一个较为综合性和概括性的模型,其中的 A 、 D 和 C 又是很多因素的函数,如 D 主要是任务可靠性 R 和生存性 S_v 的函数^[7]。同时,式(1)的描述对象是纯粹的单机飞机的系统效能,在评价机群或机队的整体作战效能上还有一些局限性,例如,若可以保证足够数量的飞机同时去完成一项作战任务,任务成功率会大大提高,存在机队体系规模的影响系数。

因此,本文在ADC模型的基础上,从作战效能的定义出发,综合考虑对武器装备完成作战任务的影响因素,提出了军用飞机作战效能的广义模型,其表达式为:

$$E_z=f(C_z, A, R, S_v, B, T, M, N) \quad (2)$$

式中: E_z 是飞机的系统作战效能; C_z 是飞机的作战性能矩阵,反映了飞机的固有作战能力,如飞机的性能、武器系统的威力等; A 是可用性向量,是可用性的概率度量指标; R 是任务可靠度矩阵,是任务可靠性的概率度量指标,表征了飞机在规定的任务剖面内完成规定功能的能力; S_v 是生存性矩阵,是生存力的度量,表征了飞机在执行作战任务时躲避和承受人为敌对环境的能力; B 是体系规模影响系数矩阵,反映了机队体系规模对系统作战效能的影响; T 是战术能力系数矩阵,反映了人的作战指挥、协同、技术能力对系统作战效能的影响; M 是维修保障组织能力系数矩阵,反映了维修保障的体系架构、指挥能力、人员素质等对系统作战效能的影响; N 是机队规模数量。

如果将各影响参数对作战效能的影响简单地以线性关系表示时,模型可以表达为:

$$E_z=C_zARS_vBTMN \quad (3)$$

根据式(2)反映出的飞机作战效能的一些特点有:

首先,作战效能存在“短板效应”。公式中各项参数只要其中的某一项很差,那么飞机整体的作战效能就会受到很大影响。例如,性能再好的飞机(作战性能高),出勤率很低(可用性低),临战时上百架飞机中只有几架可用,飞上天后,故障不断(可靠度低),部分飞机还要被迫返航,这时的系统作战效能就非常低。

其次,作战效能具有相对性。由于飞机作战效能的影响因素太多,很难评估出其作战效能的绝对

大小。此外,对作战效能进行评估的主要目的是为了与其他飞机进行对比,或者是对影响作战效能的几项活动方案进行对比,评估出的效能只要相对值即可,即使能得到绝对评估结果,也没有太大的意义。

再次,作战效能具有任务相关性和时效性。在不同类型的作战任务下,式(2)中参数取值可能是不一样的,若某些参数影响较小或不考虑它们的影响时,其值取 1;此外,在不同的时期或针对不同的评估目的,式(2)中的参数可以选用不同的度量指标,如可用度可以使用固有可用度、可达可用度、使用可用度、出动架次率、能执行任务率、储存可用度等指标表示,需要注意的是,在进行作战效能对比时,比较对象所选用的度量指标应是一致的。

1.2 基于作战效能的维修与保障概念

简单来说,基于作战效能的维修与保障就是以提高装备作战效能为目标的维修与保障活动,这个目标是通过优化维修保障活动而实现的。基于作战效能的维修保障的核心是对维修与保障工作的优化决策,关键是要建立维修与保障工作对作战效能的影响模型。

维护和修理合称为维修,通常所说的定时维修、以可靠性为中心的维修(RCM)和基于状态的维修(CBM)等是根据维修方式的不同进行的定义;此外,以维修时机来划分可以将维修分为预防性维修、修复性维修、改进型维修等。而基于作战效能的维修是与基于经济性的维修相对应的,它们是以维修的最终目的不同而界定的,见图 1。

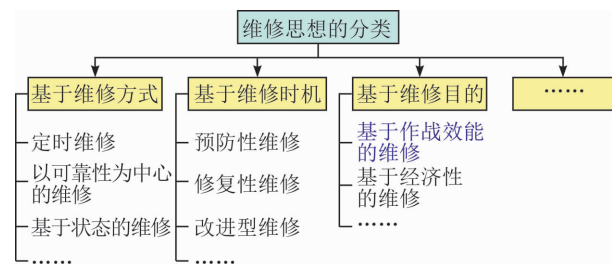


图 1 维修思想的分类方法

为保持军用飞机的作战效能,除了维护和修理工作外,还涉及工具器材、消耗品的运输、储备、补给等工作,即装备供应保障工作^[9]。基于作战效能的维修与保障是对维修和保障活动的综合。

2 基于作战效能的维修与保障内涵

军用飞机在服役使用过程中,要恢复、保持和提高其作战能力,必须要有相应的维修与保障工作与

之匹配。维修与保障工作牵涉到很多因素,且各因素之间有时是相互影响或者耦合的,它们对军用飞机的作战效能的影响也是不同的。一些典型的维修与保障活动对军用飞机作战效能的影响可用图 2 简单描述。

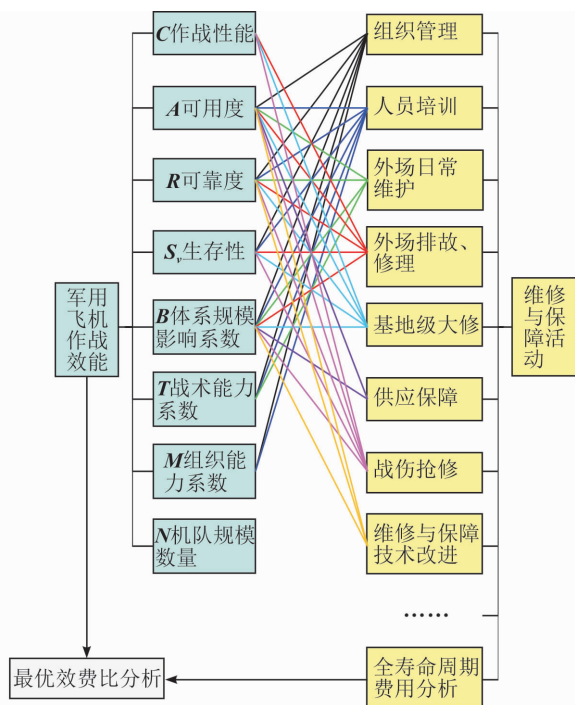


图 2 维修与保障活动对作战效能的影响

军用飞机的维修与保障活动始终是以完成作战任务为根本目的,其根本目标是作战效能最大化,并且在达到作战效能的基础上力争实现经济性的最优。

对于军用飞机的同一项维修/保障任务,实际上可以通过很多种不同的维修/保障方案去实现。但是,不同的维修/保障方案均有其各自的特点(例如,有的方案速度快但效果欠佳,有的方案效果好但耗时很长),对作战效能的各个参数的影响也就不同,从而对飞机最终的作战效能产生不同的影响。因此,基于作战效能的维修与保障工作,是以作战效能最大化为目标,可以对维修与保障方案进行优选。这里以飞机结构战伤抢修的几个不同方案示意如下(见图 3)。

从图 3 可以看出,基于作战效能的军用飞机维修与保障的基本内涵是:在厘清维修与保障活动对军用飞机作战效能的影响关系的基础上,建立作战效能与维修/保障活动的关系模型,通过对维修与保障活动方案的优选实现维修与保障活动的最优化,从而实现军用飞机作战效能的最大化。基于作战效能的维修与保障策略也可以适用于其他军用装备的维修与保障工作。

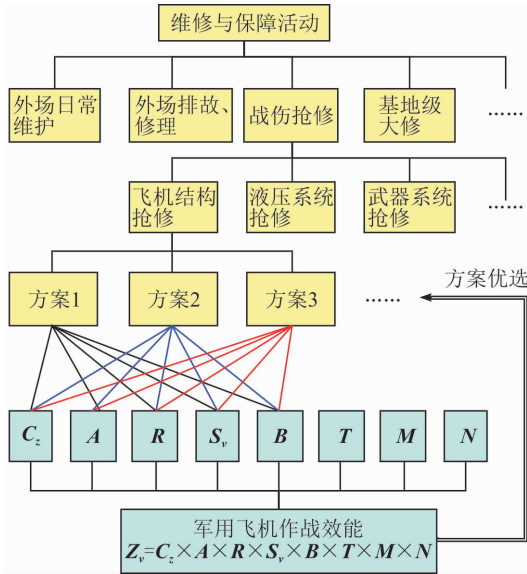


图3 维修/保障方案对作战效能的影响示意图

3 基于作战效能的维修与保障实施流程

3.1 具体实施流程

基于作战效能的维修与保障就是以提高飞机作战效能为目标牵引的维修与保障活动,其实施流程见图4。

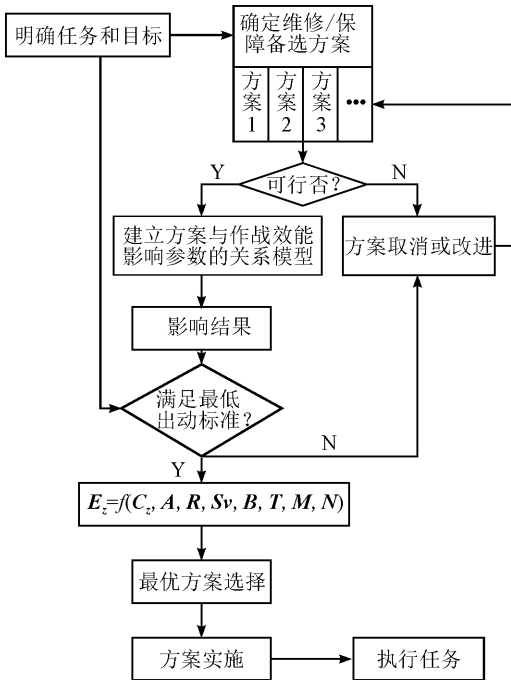


图4 基于作战效能的维修与保障实施流程

1) 根据飞机要完成的作战(或训练)任务,明确维修/保障工作的目标。

2) 为保障任务的顺利实施,确定对飞机的维修/保障备选方案,这里的维修/保障方案既包括维修/

保障的方式,也包括维修/保障的深度。

3) 确定维修/保障能力、时间限制、经费限制等约束条件,并根据约束条件确定维修/保障方案是否可行,取消不可行方案或对其进行改进。

4) 对于各个可行的维修/保障方案,考虑方案的实施消耗、实施时间、最终实施效果等,建立各方案与作战效能影响参数的关系模型,得到各方案对作战效能影响参数的影响结果。

5) 依据得到的各方案对作战效能影响参数的影响结果,判断在预期作战任务下各方案是否满足飞机的最低出动标准,若不满足,需取消方案或对其进行改进。

6) 将满足最低出动标准的方案的评估结果代入作战效能表达式,评估各维修与保障方案下,飞机完成预期作战(或训练)任务的作战效能。

7) 通过对比,选取作战效能最高的方案作为最优方案;或在作战效能类似,选取维修保障资源消耗最小、稳健性最好的方案为最优方案。

8) 实施最优的维修与保障方案,实施完毕后飞机执行作战(或训练)任务。

上述流程是基于作战效能对维修与保障活动的优化决策过程,其核心是根据作战效能表达式进行的最优化方案选取,重点和难点是建立维修保障方案与作战效能影响参数的关系模型。

3.2 示例分析

现以1个简单示例进行说明,作战效能的表达式以式(3)表示。

某机在战时平尾被打伤返场,需尽快修复以参加到后续的空战任务中。

1) 任务目标是快速恢复或部分恢复平尾性能,使飞机满足后续空战机动飞行要求。

2) 根据平尾损伤程度,初步制定3种修理方案,方案1是整体更换平尾,方案2是使用金属贴板进行快速修补,方案3是使用复合材料补片进行较彻底修补。

3) 对3种方案的可行性进行评估,外场对方案2和方案3有完全实施条件,但方案1由于缺少备件不能实施,对方案1进行改进,改为从报废飞机上串换平尾,经评估,改进后方案1可以实施。

4) 建立各方案与作战效能影响参数的关系模型。本例中3种方案对作战效能表达式中的作战能力 C_z , 可用度 A , 任务可靠度 R , 生存性 S_v , 体系规模影响系数 B 均有影响。在战场环境下,模型的基本形式应该是已经存在的,可以通过评估软件等方式快速得到评估结果,本例以方案1为基准,假设各方案下各影响参数的比例关系为

$$\begin{aligned}
 C_{Z1} : C_{Z2} : C_{Z3} &= 1 : 0.85 : 0.9 \\
 A_1 : A_2 : A_3 &= 1 : 1.3 : 1.2 \\
 R_1 : R_2 : R_3 &= 1 : 0.95 : 0.95 \quad (4) \\
 S_{v1} : S_{v2} : S_{v3} &= 1 : 0.95 : 0.95 \\
 B_1 : B_2 : B_3 &= 1 : 1.2 : 1.15
 \end{aligned}$$

需要说明两点问题:一是各作战效能影响参数的赋值十分复杂,本例仅是以简单的比例关系进行了示意,后期还应开展深入研究;二是有些作战效能影响参数的取值不可能大于 1,式(4)中表示的仅是比例关系,需注意区分。

5)通过对作战任务分析,确定飞机的机动性最低需满足原有性能的 85%,可靠性和生存力最低需满足原有性能的 90%。方案 1 是串换平尾,可以完全恢复飞机原有性能指标,因此,通过式(4)可以看出,3 个方案均满足预期作战任务下的飞机的最低出动标准。

6)建立的关系模型代入式(3),得到 3 种方案下的飞机作战效能对比关系为:

$$E_{Z1} : E_{Z2} : E_{Z3} = 1 : 1.20 : 1.12 \quad (5)$$

7)通过对比发现,执行方案 2 可以保证飞机迅速出动,使飞机可用度和体系规模影响系数明显提高,虽然牺牲了飞机的部分作战能力、任务可靠度和生存性,但在可以接受范围之内,且飞机的系统作战效能明显更高。因此,选取方案 2 作为具体实施方案。

8)实施方案 2,实施完毕后飞机执行作战任务。

以上示例是战时的飞机维修示例,需要说明的是,基于作战效能的维修与保障不仅可以用于战时,也可以用于指导平时的维修与保障工作。

例如,在飞机大修时,通过加大修理深度可以使飞机的可靠度得到恢复或提升,从而使作战效能表达式中的可靠度 D 值增大;但如果继续过分地加大修理深度, D 值的增大可能将不再明显,而此时过度的修理反而会占用过多的修理资源,使大修效率降低,影响机队后续飞机的正常修理,从而使机队飞机的可用度降低,即 A 值减小。在这个过程中,随着修理深度的增加,机群飞机的作战效能(E_Z 值)先增后降,存在一个最优解,对应着一个最优的修理深度。

明显的,如果采用基于作战效能的维修与保障策略,引入维修与保障方式对作战效能的影响模型,可以对上述战伤抢修方式和大修方式进行精确、合理的量化评估,从而实现飞机作战效能的最大化。基于作战效能的维修与保障的最大优势就是将模糊的决策通过数学模型进行了量化,从而精确地实现维修与保障活动的优化。

4 基于作战效能的维修与保障关键问题

在实施基于作战效能的维修与保障的过程中,有很多问题需要解决,但最关键的几个需要解决的问题如下:

4.1 建立作战效能影响参数的计算模型

“基于经济性的维修与保障”的最终目的是在保证安全的前提下达到经济性最优,其主要指标是“费用”,易于量化,也可以很方便地建立相关模型并实现对维修与保障活动的优化决策。而作为军用飞机,其主要职能是作战和准备作战,制定的维修与保障策略应是以提高飞机的“作战效能”为根本出发点,然而,“作战效能”是一个较为“定性”的指标,怎样对其量化处理就成为了一项关键问题。

对作战效能的量化主要是通过建立作战效能影响参数的计算模型而实现的。目前,相关领域(特别是可靠性、维修性、保障性等领域)对作战效能影响参数的计算模型已开展了大量的研究^[5-10],本文在这里不再详述,但对其进行应用时需注意以下问题:

1)建立的作战效能影响参数计算模型应重点考虑维修与保障方式对作战效能的影响关系,从而才可用于后续的对维修/保障活动的优化过程。

2)必须要提高模型应用效率才能在实际工程中(特别是战时)可用。一方面,可以提前预置各类维修/保障方案与作战效能影响参数的关系模型,编制出相关软件或数据库,在战时就可以开展快速评估;另一方面,在很多情况下可以对模型进行简化,只要最终能形成各方案的对比关系即可,类似于式(4)。

4.2 基于作战效能的维修与保障方案优化

将建立的作战效能影响参数的计算模型代入式(2),即可得到具体维修/保障方案对作战效能的影响模型为:

$$\begin{aligned}
 E_Z &= f[C_Z(x_1, x_2, \dots, x_n), A(x_1, x_2, \dots, x_n), \\
 &R(x_1, x_2, \dots, x_n), S_v(x_1, x_2, \dots, x_n), B(x_1, x_2, \dots, x_n), \\
 &T(x_1, x_2, \dots, x_n), M(x_1, x_2, \dots, x_n), \\
 &N(x_1, x_2, \dots, x_n)] = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中: $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为具体维修/保障方案下的参数量值(如维修/保障时间等参数)。

任一维修/保障方案可表示为 $X_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}\}$ 。根据给定的 n 个备选方案 X_1, X_2, \dots, X_n ,可以得到对应的 n 个作战效能 $E_{Z1}, E_{Z2}, \dots, E_{Zn}$,进而得到最佳方案:

$$E_Z^* = \max\{E_{Z1}, E_{Z2}, \dots, E_{Zn}\} \quad (7)$$

但是,在实际分析过程中,可能出现若干方案下

作战效能相当,不易直接进行决策的情况,即不妨记为 $E_{Z_1} \geq E_{Z_2} \geq \dots \geq E_{Z_n}$, 若 $E_{Z_1}, E_{Z_2}, \dots, E_{Z_p}$ ($p \leq m$) 相当(如 $E_{Z_1} - E_{Z_p} < \delta, \delta$ 为事先设定的较小量)则需要对方案 X_1, X_2, \dots, X_p 进行灵敏度分析,进而选择稳健性最好或维修保障资源消耗最小的方案作为决策结果。

5 结论

从本质上讲,民用产品的维修与保障根本目的是实现经济性的最优化,而军用飞机的维修与保障根本目的是实现作战效能的最大化,并在此基础上寻求经济性的最优化。本文针对军用飞机的维修与保障活动,开展了以下几方面的工作。

1)从作战效能的定义出发,综合考虑对武器装备完成作战任务的影响因素,提出了作战效能的广义模型,并在此基础上,提出了基于作战效能的维修与保障的概念。

2)阐述了基于作战效能的维修与保障内涵:在厘清维修与保障活动对军用飞机作战效能的影响关系的基础上,建立作战效能与维修/保障活动的关系模型,通过对维修与保障活动方案的优选实现维修与保障活动的最优化,从而实现军用飞机作战效能的最大化。

3)建立了基于作战效能的维修与保障实施流程,并进行了举例说明;针对基于作战效能的维修与保障关键问题进行了探讨。

通过实施基于作战效能的维修与保障,可以将作战效能与维修保障活动的关系通过数学模型进行量化,从而优化维修与保障活动,实现军用飞机作战效能的最大化。基于作战效能的维修与保障策略也可以适用于其他军用装备的维修与保障工作。

致谢:在本文的完成过程中,与郭基联教授、王卓健副教授进行了有益的讨论,作者在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] DEKKER R, WILDEMAN R E, FRANK A, et al. A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence[J]. *Mathematical Methods of Operations Research*, 1997, 45(3): 411-435.
- [2] PARK G P, YOON Y T. Application of Ordinal Optimization on Reliability Centered Maintenance of Distribution System[J]. *European Transactions on Electri-*

cal Power, 2012, 22(3): 391-401.

- [3] JARDINE A K S, LIN D M, BANJEVIC D. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(7): 1483-1510.
- [4] NGUYEN K A, DO P, GRALL A. Multi-Level Predictive Maintenance for Multi-Component Systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 144: 83-94.
- [5] 马绍民, 章国栋, 刘用权, 等. 综合保障工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
MA S M, ZHANG G D, LIU Y Q, et al. *Comprehensive Support Engineering*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [6] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. *Combat Aircraft Effectiveness Evaluation*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 张恒喜, 刘晓东, 段宝君, 等. 现代飞机效费分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
ZHANG H X, LIU X D, DUAN B J, et al. *Cost-Effectiveness Analysis of Modern Aircraft*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [8] ZHANG G F, QIAO X M, LUO M, et al. Effectiveness Evaluation Model of Fixed Wing UAV Based on the Improved ADC Model[C]//2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems. Beijing, 2017: 288-292.
- [9] 杜晓明, 古平, 高鲁, 等. 基于仿真的装备故障效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
DU X M, GU P, GAO L, et al. *Effectiveness Evaluation of Equipment Support Based on Simulation*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [10] 韩坤, 何成铭, 刘维维, 等. 以系统效能为目标的装甲车辆可靠性、维修性、保障性和测试性权衡分析[J]. *兵工学报*, 2014, 35(2): 268-272.
HAN K, HE C M, LIU W W, et al. Trade-Off Analysis of Reliability / Maintainability / Supportability / Testability of Armored Vehicle Based on System Effectiveness[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(2): 268-272. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)