

军用飞机结构作战完整性的基本内涵与评估

何宇廷¹, 张 腾^{1,2}, 马斌麟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 传统的飞机结构完整性概念是从飞机正常使用的角度逐步发展起来的。对于军用飞机,其根本职能是作战使用,传统的结构完整性概念存在一定的局限性,不适用于军用飞机的作战阶段。通过对已有的飞机结构完整性概念的扩展和深化,提出了军用飞机作战完整性、修复性和结构作战完整性等基本概念,阐述了军用飞机结构作战完整性的基本内涵,并对军用飞机结构作战完整性的评估方法以及评估中涉及到的试验方法进行了探讨。

关键词 军用飞机;飞机结构;作战完整性;修复性;作战评估

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.05.001

中图分类号 V215.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)05-0001-07

Basic Connotation and Evaluation of Military Aircraft Structural Operational Integrity

HE Yuting¹, ZHANG Teng^{1,2}, MA Binlin¹

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Unit 94354, Jiaxiang 272412, Shandong China)

Abstract: The existing concept of aircraft structural integrity has been evolved under the conditions that the aircraft was in normal use. Operational use is the fundamental function of military aircraft. The traditional concept of aircraft structural integrity has some limitations, and it is not suitable for military aircraft in operational phase. Through the improvement and deepening of the traditional concept of aircraft structural integrity, concepts of military aircraft operational integrity, recoverability and military aircraft structural operational integrity are put forward in this paper, and the connotation of the military aircraft structural operational integrity is expounded. Finally, the evaluation methods of military aircraft structural operational integrity and the related test methods involved in the evaluation are discussed.

Key words: military aircraft; aircraft structure; operational integrity; recoverability; operational evaluation

飞机结构完整性是指在要求的结构耐久性、可保障性、安全性和结构能力水平下,结构可正常使用及功能未受到削弱时所处的状态。飞机结构完整性的概念最早由美国空军在 1954 年提出,并伴随着美

国空军出现的一系列事故而逐步发展完善,相应的标准——飞机结构完整性大纲(Aircraft Structural Integrity Program, ASIP)也随之进行了十余次补充与改版。美国最新的 ASIP 是 2016 年发布的

收稿日期: 2019-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(51475470); 国家重点研发计划(2018YFF0214702); 陕西省重点研发计划(2018GY-021)

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,马斌麟. 军用飞机结构作战完整性的基本内涵与评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 1-7.
HE Yuting, ZHANG Teng, MA Binlin. Basic Connotation and Evaluation of Military Aircraft Structural Battle Integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 1-7.

MIL-STD-1530D^[1],与之相比,我国最新的 ASIP 是 GJB775. A—2012。

ASIP 是军用飞机结构设计中的纲领性文件,针对影响飞机安全使用和成本费用的机体强度、刚度、耐久性、损伤容限开展五大基本任务,分别是设计资料、设计分析与研制试验、全尺寸试验、合格审定与部队管理对策、部队管理实施^[1]。

显然,现行的 ASIP 仅从飞机安全使用和成本费用的角度进行了考虑,所针对的机体强度、刚度、耐久性、损伤容限也只是军用飞机服役的基本要求,可以保证常规训练条件下的结构完整。然而,军用飞机主要是面向作战的,在错综复杂的作战条件下,军用飞机要面临大强度飞行、超负载使用、武器打击损伤等战场环境的影响和威胁,还要考虑有限保障条件和战伤后的再次出动等实际情况,当前的 ASIP 并不能使结构达到“可正常使用及功能未受到削弱”的完整性要求。

因此,针对军用飞机的作战职能,需要对传统的飞机结构完整性概念进行完善和深化,使其更好地应用于军用飞机作战和训练全阶段。为此,本文提出了军用飞机作战完整性、修复性和军用飞机结构作战完整性等基本概念,阐述了军用飞机结构作战完整性的基本内涵,并对军用飞机结构作战完整性的评估方法以及评估中涉及到的试验方法进行了探讨。

1 军用飞机作战完整性的基本概念

完整性一词已成为了表征飞机质量特性的一个重要概念^[2-3],最初被提出的是飞机结构完整性,而后又衍生发展出了发动机结构完整性^[4]、航空电子设备完整性^[5]和机械设备及子系统完整性^[6]等,在飞机功能系统级的完整性上,则有武器系统完整性^[7]和推进系统完整性^[8]的概念。针对飞机整机,其完整性是指在要求的耐久性、保障性、安全性和飞机能力水平下,飞机可以正常使用及功能未受到削弱时所处的状态。

军用飞机的完整性设计思想在保证飞机整机完整性上发挥了重要作用。但是,传统的军用飞机完整性面向的主要是训练(作战准备)阶段,是对军用飞机在服役中的最基本要求,不适用于军用飞机的作战阶段。以飞机结构为例,传统的结构完整性在部队管理实施过程中主要进行载荷/环境谱测量,目的是更新全尺寸试验分析结论,从而实现结构的准确定寿;而在作战阶段,战场条件下结构的载荷/环境谱是不可预期的,也来不及对飞机结构定寿结论

进行更新,更没有考虑到结构战伤带来的影响。

因此,对于军用飞机,亟需提出一个新的完整性概念,使其对训练阶段和作战阶段的完整性均能进行良好表征,即作战完整性。在战时,飞机完整性的主要任务应是保持飞机在规定条件下的持续作战能力。因此,为满足战时要求,在原有完整性指标体系基础上,还应考虑增加影响持续作战能力,且反映飞机固有特性的指标。

为此,给出了军用飞机作战完整性的概念:在作战实施和作战准备(训练)阶段,在要求的耐久性、保障性、安全性、飞机能力、生存力和修复性水平下,飞机可以正常使用及功能未受到削弱时所处的状态。对于军用飞机的各组成系统,也可以定义相应系统的作战完整性。

与飞机完整性的概念相比,军用飞机作战完整性增加了对生存力和修复性 2 个指标的要求。反映在军用飞机的任务链条上,原有的完整性指标——耐久性、保障性、安全性和飞机能力,反映的是飞机战前(包括训练)能否出动功能完好的飞机的问题;而新增的作战完整性指标——生存力和修复性,反映的是飞机战时能否持续完成作战任务的问题。军用飞机的作战完整性差表现在如图 1 所示的 6 个方面。

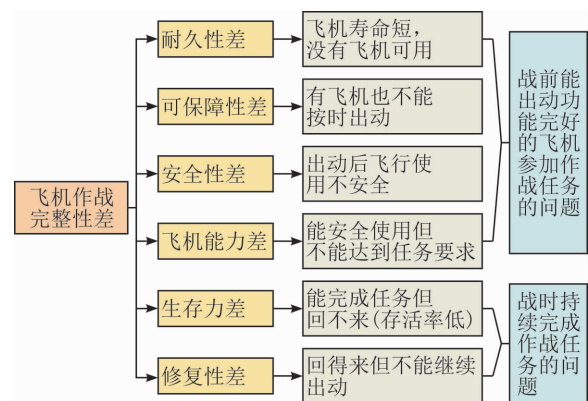


图1 军用飞机作战完整性差表现形式

对于飞机作战完整性与装备“六性”的关系可以简单分析如下:装备“六性”是指可靠性^[9]、安全性^[10]、维修性^[11]、测试性^[12]、保障性^[13]和环境适应性^[14],合称为装备的通用质量特性,是围绕着装备的故障问题逐步发展和完善起来的,主要目的是保障装备在服役期内满足平时储备和实际使用要求,确保稳定的工作状态和技术性能、降低周期费用^[15]。飞机完整性是随着飞机事故而逐步发展和完善起来的,并形成了结构完整性大纲,在此基础上,军用飞机结构作战完整性对其进行了扩展和深化。总的来说,军用飞机作战完整性中的 6 项指标要求在“六性”中均有体现。但两者相比,装备“六

性”是装备的通用质量特性,是从可靠性、安全性、维修性、测试性、保障性和环境适应性等各个不同方向去描述飞机的质量特性,这6个方面相互之间没有联系;而军用飞机作战完整性反应的是飞机的综合质量特性,是使用耐久性、保障性、安全性、飞机能力、生存力和修复性6个分指标来对飞机的质量特性进行综合表征,6个分指标之间在作战链条中有明显的逻辑关系。

对于其他武器装备,也可以类似地定义其作战完整性。

2 军用飞机修复性的基本概念

在军用飞机作战完整性的概念中,有两项新增指标——生存力和修复性。其中,军用飞机生存力有其完善的概念,而修复性则是一项新定义的指标。

军用飞机修复性是指飞机在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法对非常规损伤(包括事故损伤、战伤等)进行修复时,恢复到完成规定任务所需的的功能的能力。

军用飞机结构修复性(或可称为恢复性)是指飞机结构在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法对非常规损伤(包括事故损伤、战伤等)进行修复时,恢复到完成规定任务所需的的功能的能力。

军用飞机结构的修复性可以使用修复度来描述,其是一项概率指标,同时主要反映在修复时间上,记为 $R_c(t)$ 。修复度 $R_c(t)$ 的含义即为在规定的时间内和规定的条件下,按规定的程序和方法进行修复,使受到非常规损伤(如事故损伤、战伤等)的飞机结构恢复到完成规定任务能力的概率,或结构受到非常规损伤的飞机,恢复到完成规定任务能力状态的飞机数量所占的比例,可用式(1)表示:

$$R_c(t) = P(T \leq t) = \frac{q_t - q_{n,t}}{q_t} \quad (1)$$

式中: T 为规定条件、程序和方法下的修复时间; t 为规定的时间; q_t 和 $q_{n,t}$ 分别指规定时间 t 内机队中,结构受到非常规损伤飞机的总数量和不能恢复到完成规定任务能力的飞机数量。

结构修复性也可以用平均修复时间MTTRC来描述,MTTRC即为具有一定意外损伤级别的飞机结构,由具有规定技术水平的人员,利用规定的程序和资源(设备、工具、备件、人力、物流等)进行修复时,修复到规定功能所用的平均时间,可用式(2)表示(简记: M_c):

$$M_c = E(Y) = \int_0^{\infty} tm(t) dt \quad (2)$$

式中: Y 表示修复时间; $m(t)$ 为修复密度函数,即在 $\Delta(t)$ 时间内完成修复的概率。

此外,结构修复性也可使用意外损伤修复费用MRCC(Mean Recover Cost)来表征,MRCC即为具有一定意外损伤级别的同一型号的飞机结构,由具有规定技术水平的人员,利用规定的程序进行修复时,修复到规定功能所使用的平均资源量,通常可用使用平均费用来衡量。该指标通常用于类似装备修复性之间的比较。

显然,修复性是军用飞机的一种固有特性,主要通过飞机的设计过程来提高。具有高修复性的飞机在发生事故损伤或战伤时,维修人员能够在有限条件下方便、快速地恢复飞机的能力。特别是在战场环境下,高修复性对提高飞机的再次出动能力以及维持作战机队规模具有重要意义。

军用飞机的修复性和维修性都是通过设计过程赋予的飞机固有特性,有许多共同的要求:如可达性、互换性、防差错等。然而,修复性和维修性又有明显的区别:维修性针对的是装备的自然故障,包括因可靠性和质量问题产生的故障以及人为差错等,重点在于“维护修理”,一般有预期的标准维修或排故方案;而修复性针对的是意外损伤,包括事故损伤(如鸟撞、雷击等)和战伤(如武器击伤和二次损伤等),重点在于“修理恢复”,更加强调的是针对不可预见的故障的修复措施。此外,与维修性设计相比,修复性设计应更加注重模块化设计思想的运用,更加有利于方便、快速地恢复受损部位的能力。

类似的,对其他装备、产品及其子系统,修复性的概念和度量公式同样适用。

3 军用飞机结构作战完整性的基本概念

对一架飞机而言,飞机结构在整个系统中发挥着最基础的平台作用,应在军用飞机作战完整性中重点研究,由此可以衍生出军用飞机结构作战完整性的基本概念。军用飞机结构作战完整性是在作战实施和作战准备(训练)阶段,在要求的安全性、耐久性、结构能力、保障性、生存力和修复性水平下,飞机结构可以正常使用及功能未受到削弱时所处的状态。

其中,耐久性是指飞机结构在规定的周期内抵抗开裂、腐蚀、热退化、分层、磨损和普通外来物损伤的能力;保障性是指飞机结构的设计特性和计

划的保障资源满足平时战备完好性和战时利用率要求的能力;安全性是指飞机结构在工作状态和使用环境下避免结构及其组成部分的损毁、损伤,以及避免造成财产损失及环境破坏的能力,主要与结构损伤容限水平相对应;结构能力是指结构的强度和刚度问题,而结构刚度在设计制造阶段已经固化,故在此结构能力主要指结构的强度;生存力是指结构能够预防、承受或减轻敌对及特殊环境的影响,保持其完成规定任务的能力^[16];修复性是指结构在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法对非常规损伤(包括事故损伤、战伤等)进行修复时,恢复到完成规定任务所需的的功能的能力。

4 军用飞机结构作战完整性的基本内涵

4.1 结构作战完整性的基本特性

飞机结构作战完整性的基本特性可以概括为客观性、相对性、随机性和可控性。

客观性是指飞机结构作战完整性是客观存在的一种结构的属性,可以使用某种手段去度量。相对性是指飞机的结构作战完整性是针对其承担的作训任务和环境而言的,离开了对应的任务和环境则没有意义。随机性是指由于飞机结构本身质量、承担任务和工作环境的随机导致飞机结构作战完整性也具有随机特性,所以可以使用概率统计的方法来描述飞机结构作战完整性。可控性是指飞机结构作战完整性可以通过一定的措施实行控制,使飞机的结构作战完整性得到保持和增长^[10,17]。

4.2 结构作战完整性中各指标间的联系

军用飞机结构作战完整性是在作战实施和准备阶段保证飞机机队规模、正常出动、安全使用、完成作战任务和在上战场上存活的基础,直接影响部队战斗力。根据飞机结构作战完整性的定义,飞机结构作战完整性差可以体现在耐久性差、保障性差、安全性差、结构能力差、生存力差和修复性差中的一个或几个方面,对飞机作战任务链条的影响同样可由图1来反映。

耐久性差,则导致飞机结构寿命短,没有飞机可用;保障性差,则导致飞机结构不易维修保障,有飞机也不能按时出动;安全性差,则导致出动后结构易发生事故,飞机使用不安全;结构能力差,则导致飞机即使能安全飞行,但由于结构能力限制不能满足任务要求;生存力差,则导致即使能完成任务,但结构在敌方火力威胁下存活率低,飞机不能顺利返回;而修复性差,则会导致受损飞机即使回得来但结构

也不能按时得到修复,飞机无法继续出动。

可以看出,在结构作战完整性中,任何一方面的指标短缺,都会导致飞机结构作战完整性的整体水平不高,即结构作战完整性指标体系符合“木桶原理”,在飞机全寿命周期中必须全面、协调考虑。

4.3 结构作战完整性与传统结构完整性的关系

军用飞机的根本职能是作战使用。与传统的结构完整性相比,一方面,军用飞机结构作战完整性增加了与战场环境相关的2个指标要求——生存力和修复性,这是对传统结构完整性的扩展;另一方面,军用飞机结构作战完整性还需要在耐久性、保障性、安全性、结构能力4个方面开展与作战问题相关的深化研究(如战伤修复结构的四方面问题研究等),这是对传统结构完整性的深化。

军用飞机结构作战完整性是对传统结构完整性的扩展,增加了生存力和修复性两方面的指标。结构生存力是飞机生存力的重要组成部分,是设计赋予飞机的固有属性,对提高飞机训练和作战效能有着突出的贡献,是飞机战斗力的重要组成部分。在作战阶段,飞机战伤可分为直接损伤和间接损伤。直接损伤主要是武器打击,包括弹丸、破片、热瞬变和超压等,而间接损伤主要是坠撞。因而飞机的抗武器损伤能力和适坠性的好坏决定了飞机结构生存力的大小。结构修复性包括了对事故损伤和战伤等非常规损伤的修复,在战时,外场级的修复性就相当于抢修性^[18]。军用飞机结构修复性的好坏反映在两个方面,一是在发生损伤,尤其是非常规损伤时飞机结构是否容易地被修复,反映在修复时需要的保障设备、修复技术、人力、时间等方面;二是在发生相同的损伤时,飞机结构修复起来是否是经济的,反映在修复时需要的备件、耗材和费用等方面。当修复所需的费用和时间超过某一规定值时,结构修复就不划算了,此时就认为该结构不可修复了。

军用飞机结构作战完整性是对传统结构完整性的深化。对于耐久性、安全性和结构能力,传统的结构完整性只考虑训练载荷作用下的结构寿命、损伤容限和强度问题,而在结构作战完整性中,除了上述考虑,还增加了对作战载荷作用下的结构寿命、损伤容限和强度问题,以及进行战伤修复后结构的寿命、损伤容限和强度问题;对于可保障性,传统的结构完整性只考虑正常训练条件下结构的设计特性和计划的保障资源满足任务保障要求的能力,而在结构作战完整性中,除了上述考虑,还增加了在战时有限保障条件和有限备件情况下结构的设计特性和计划的保障资源满足任务保障要求的能力。

5 军用飞机结构作战完整性的评估

作为军用飞机结构的一种固有属性,飞机结构作战完整性可以通过一定的手段进行评估。在此,评估是试验和评价的统称。试验是指实际的试验,以便获取数据资料,按照“积木式”的试验思想,一般可以分为元件级、模拟件级、构件级或组件级、部件级和全机级5级。评价则是用一定的数学手段去分析试验数据,以便做出决策的过程。军用飞机的结构完整性的评估,需要首先进行耐久性、安全性、保障性、能力、生存力和修复性的试验,然后以试验的结果为基础,结合仿真、分析手段与结果,做出对结构作战完整性的综合评价。

5.1 飞机结构耐久性试验

飞机结构耐久性水平^[19-20]通过结构疲劳试验、腐蚀试验、磨损试验等手段考核,其中,以疲劳试验为主,通过“积木式”试验方法考核结构的耐久性寿命。

结构耐久性全尺寸试验是在飞机设计定型及投产之前,使用完整的机体或批准的代用件进行耐久性试验,考核飞机结构整机耐久性水平。耐久性试验载荷谱应充分利用已有的系列飞机实测载荷谱,要求完成2~4倍使用寿命期的耐久性测试。

目前,传统飞机结构完整性大纲中规定的飞机结构耐久性试验主要是针对正常的结构状态和载荷状态,对于结构作战完整性而言,还应考虑修复后的结构状态和作战载荷。建议采用模拟件或构件级的方式对修复后的结构开展试验^[21]。从而供战伤评估人员根据作战需求选择合适的结构修复方式、供部队装备管理部门掌握修复后的飞机状态。

5.2 飞机结构保障性试验

结构保障性试验应该在飞机的全寿命阶段进行,根据实施阶段的不同,可以分为研制阶段、使用阶段和部署后的保障性试验^[22]。

研制阶段试验是在飞机结构的设计和研制过程中协助结构的工程设计和制造所进行的试验,确定所有和保障性相关的重要设计问题和提出解决的办法,试验主要集中在飞机结构及其保障系统的工程设计和制造是否符合技术规范,以及飞机结构保障包的技术效能和适用性如何。使用阶段试验一般是指在飞机服役之前,在尽可能接近真实训练和作战的使用环境中,由军事人员按部队的保障体制和保障方案对飞机结构进行保障试验,这是保障性试验中的主要试验。部署后的保障性试验,主要是在使用部队建立现场信息收集系统,在实际使用环境(训

练和作战环境)中采集有关飞机结构的使用、维修和供应数据。

针对结构作战完整性,需要注重开展战时(或模拟战时条件)的结构保障性试验。根据战时结构保障性试验结果,一方面,可以改善飞机的战时保障性设计,在战时某些资源可能发生短缺的情况下(例如,没水没电)保证飞机能够按时出动^[19];另一方面,可以为确定各机场、场站的预置保障装备提供参考依据。

5.3 飞机结构安全性试验

飞机结构的安全性水平^[19]主要通过损伤容限试验进行考核。通过“积木式”试验方法,分析结构/材料的裂纹扩展和剩余强度特性等。此外,当飞机投入使用后,通过收集飞机结构在训练和作战使用环境下的事故和事故症候数据进行结构安全性分析。

结构的损伤容限全尺寸试验一般结合耐久性全尺寸试验进行。在开展最后1倍的疲劳考核前,需要在安全关键件上预置初始裂纹,而后通过1倍的寿命期的考核,测试结构的损伤容限水平。通常认为,结构的裂纹扩展分散系数取2,因此,在飞机服役时通过在服役中期设置结构检查项目的方式来确保结构安全。

与耐久性类似,传统的损伤容限试验主要也是针对正常的结构状态和载荷状态。对于结构作战完整性而言,一方面,由于战时的大机动载荷可能导致裂纹加速扩展和提前断裂,需要考虑战时载荷问题;另一方面,战时还广泛涉及了损伤结构和修复后结构的安全性问题,需要对其进行评估。

5.4 飞机结构能力试验

飞机结构能力,本质上是指静强度和刚度能力。飞机的刚度在设计制造完成后基本定型,不会发生太大变化,故结构作战完整性的结构能力主要关注结构静强度问题。因此,飞机结构能力试验主要是指结构的静强度试验,通过“积木式”试验方法进行考核。

结构静强度全尺寸试验就是通常所说的全机静力试验,试验结果一般要覆盖飞机极限载荷的100%~120%,从而保证结构在极限状态下的使用安全。

针对结构作战完整性,对战伤结构或修复后结构的静强度评估同样重要,并由此决定了飞机的限制使用条件。这需要在平时提前做好试验和经验积累,从而在战时快速地给出准确评估结果^[23]。

5.5 飞机结构生存力试验

飞机结构生存力试验即为飞机结构的战伤模拟

试验和战伤实弹试验。

飞机结构的战伤模拟试验可以根据 GJB 767—1989《小口径炮弹对飞机、直升机毁伤试验方法》进行。在模拟试验中,首先,可按飞机结构部位的易损性,将其划分为几个典型的要害部位,用多层间隔的靶板组等效典型要害位置,形成一个等效靶板体系,以便检测弹丸毁伤效果。通常使用毁伤容积、标准毁伤容积、毁伤容积比、破孔尺寸、破片覆盖区和裂纹区等参数描述模拟件的损伤程度。

实弹试验通过发射空战中可能遇到的弹药,来测试具有空战配置的飞机结构,且主要侧重于在考虑潜在损坏、攻击敏感性和空战性能的条件下进行易损性测试。二战以来,美军在赖特-帕特逊空军基地和海军空战中心等试验设施中,对实际飞机及部件进行了大量的破坏性试验。实弹试验根据测试目标,可分为部件级、子系统级、子组件级和全尺寸级试验。对于上述的每一级别,均需针对包含所有危险材料(例如,弹药,燃料,液压油等)、系统部件(例如,具有工作电压和电流的电气线路,在操作压力下含有相应流体的液压管路)和附加物品(战斗操作中,通常在该目标上的附加物品)的测试目标进行实弹射击。以机翼这种部件级试验为例,试验通过计算机控制的液压千斤顶给机翼加载来模拟机动飞机的飞行载荷,通过喷气式发动机的高速气流来模拟经过机翼的气流,且油箱注满燃油。在测试过程中需要收集大量的测量数据,包括使用高速摄像机捕获的高爆炸性燃烧弹击中飞机的过程,看到爆炸的详细效果^[24]。

5.6 飞机结构修复性试验

修复性试验中的可达性、互换性等一些指标可以结合保障性试验进行。对于事故损伤和战伤结构,则需要开展专门的试验研究。

针对非常规损伤的结构修复性试验,可以与上述的结构生存力试验或相关的鸟撞、坠毁试验相结合,在完成相关结构试验测试后马上对损伤结构进行修复性试验测试。

5.7 飞机结构作战完整性评估

通过耐久性、可保障性、安全性、结构能力、生存力和修复性试验可以得到若干结果,并结合仿真、分析手段与结果,可以进行结构作战完整性的评估。相比于其他领域的评估问题,军用飞机结构作战完整性评估在评估指标值、指标权重以及评估方法三方面存在模糊性和不确定性的特点。若基于确定值的评估方法进行计算则往往会导致评估结果的主观性和盲目性。因此,对飞机结构作战完整性进行评估时,应考虑评估过程中的模糊性和不确定性问题,

可以使用区间排序法、基于改进区间数 TOPSIS 法^[25]等方法。

4 结论

围绕军用飞机作战使用的根本职能,本文对传统的飞机结构完整性进行了扩展和深化,开展了以下研究工作:

1)提出了军用飞机作战完整性、修复性和结构作战完整性等基本概念;

2)阐述了军用飞机结构作战完整性的基本内涵;

3)探讨了军用飞机结构作战完整性的评估方法以及评估中涉及到的试验方法。

本文所提出的相关概念方法,可以转化推广到其他武器装备及其子系统。

参考文献(References):

- [1] USA Department of Defense. Aircraft Structural Integrity Program (ASIP) [Z]. Department of defense standard MIL-STD-1530D(USFA), 2016.
- [2] 王立群. 航空装备的完整性[J]. 航空学报, 1988, 9(10): 433-439.
WANG L Q. Aircraft Equipment Integrity[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(10): 433-439. (in Chinese)
- [3] 何宇廷,张腾,马斌麟. 飞机结构完整性的度量与控制[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 1-7.
HE Y T, ZHANG T, MA B L. A Measurement and Control of Aircraft Structural Integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2019, 20(3): 1-7. (in Chinese)
- [4] USA Department of Defense. Engine Structural Integrity Program (ENSIP) [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1783(USFA), 1984.
- [5] USA Department of Defense. Avionic Integrity Program (AVIP) [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1796A(USFA), 2011.
- [6] USA Department of Defense. Mechanical Equipment and Subsystems Integrity Program [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1798C(USFA), 2013.
- [7] USA Department of Defense. Weapon System Integrity Program [Z]. Department of Defense Standard MIL- HDBK-515 (USFA), 2013.
- [8] USA Department of Defense. Propulsion System Integrity Program [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-3024(USFA), 2008.
- [9] 杨进慧,戚亚群,金平,等. 重复使用液体火箭发动机结

- 构可靠性分配[J]. 火箭推进, 2018, 44(06): 39-43, 80.
YANG J H, QI Y Q, JIN P, et al. Allocation of Structural Reliability Index for Reusable Liquid Rocket Engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(06): 39-43, 80. (in Chinese)
- [10] 何宇廷. 飞行器安全性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
HE Y T. Safety Engineering of Flight Vehicle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 沈军, 徐翔, 李健, 等. 关于装备“六性”问题的几点思考[J]. 航空维修与工程, 2015(10): 50-53.
SHEN J, XU X, LI J. Some Thoughts about the Problems of "Six Indexes" of Equipment[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(10): 50-53. (in Chinese)
- [12] 刘万龙, 朱昊伟, 孙树江, 等. 国内微推力测试技术发展现状[J]. 火箭推进, 2015, 41(5): 7-11.
LIU W L, ZHU H W, SUN S J, et al. Development Status of Micro-Thrust Testing Technology in China [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(5): 7-11. (in Chinese)
- [13] 魏志鹏, 王欣, 严鸿瑞. 型号装备“六性”评审内容探讨[J]. 中国军转民, 2014(4): 40-43.
WEI Z P, WANG X, YAN H R. Discussion on "Six Indexes" Assessment Content of Equipment[J]. Defence Industry Conversion in China, 2014(4): 40-43. (in Chinese)
- [14] 彭文渊. 装备研制、生产阶段“六性”的思考[J]. 电子质量, 2018(10): 51-54.
PENG W Y. Thoughts on "Six Indexes" in Equipment Development and Production Stage [J]. Electronics Quality, 2018(10): 51-54. (in Chinese)
- [15] 张海军. 装备通用质量特性概述[J]. 军民两用技术与产品, 2015, 9(2): 252-253.
Zhang H J. Review on Quality Characteristic of Equipment[J]. Dual Use Technologies & Products, 2015, 9(2): 252-253. (in Chinese)
- [16] 古兴瑾, 许希武. 不同形状弹体高速冲击下复合材料层板损伤分析[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 432-440.
GU X J, XU X W. Analysis of Damage in Composite Laminates under High Velocity Impact by Projectiles of Different Shapes. [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 432-440. (in Chinese)
- [17] 何宇廷, 张腾, 崔荣洪, 等. 飞机结构寿命控制原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
HE Y T, ZHANG T, CUI R H, et al. Theory and Technology of Aircraft Structural Life Control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [18] 张建华. 飞机战伤抢修工程学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
ZHANG J H. Aircraft Battle Injury Emergency Repair Engineering [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [19] 中国飞机强度研究所. 军用飞机结构耐久性/损伤容限分析和设计指南[Z]. 西安: 中国飞机强度研究所, 2005.
China Aircraft Strength Research Institute. Guidelines for Durability/Damage Tolerance Analysis and Design of Military Aircraft Structures[Z]. Xi'an: China Aircraft Strength Research Institute, 2005. (in Chinese)
- [20] 中国航空研究院. 耐久性设计手册[M]. 北京: 中国航空研究院, 1994.
Chinese Aviation Research Institute. Durability Design Manual [M]. Beijing: Chinese Aviation Research Institute, 1994. (in Chinese)
- [21] 姚武文. 战伤飞机安全飞行评估标准与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
YAO W W. Criteria and Methods for Safety Flight Assessment of Battle Injured Aircraft [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [22] 马绍民, 章国栋. 综合保障工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
MA S M, ZHANG G D. Comprehensive Support Project [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [23] 姚武文. 飞机战伤模式与机理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
YAO W W. Model and Mechanism of Aircraft Battle Injury [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [24] Committee on the Study of Live Fire Survivability Testing of the F-22 Aircraft Commission on Engineering and Technical Systems National Research Council. Live Fire Testing of the F-22 [M]. Washington DC: National Academy Press, 1995.
- [25] 李曙林. 军用飞机作战使用生存力分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
LI S L. Survivability Analysis and Evaluation of Military Aircraft in Operational Use [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)