

文章编号:1674-8190(2022)03-001-11

飞行器服役(作战)完整性的提出与发展

何宇廷

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 飞行器服役完整性(对于军用飞行器也称为作战完整性)更综合地表征了飞行器在服役(作战)使用过程中的质量特性。本文首先介绍了飞行器服役(作战)完整性概念的提出过程,讨论了飞行器服役(作战)完整性的基本内涵和基本特性,阐明了飞行器服役(作战)完整性是飞行器服役(作战)适用性与飞行器服役(作战)效能发挥的基础。然后介绍了飞行器服役(作战)完整性的三种表征参数:飞行器固有完好率、飞行器固有健康度、飞行器服役(作战)完整度,并梳理了飞行器服役(作战)完整性优化设计的基本方法。最后提出了飞行器服役(作战)完整性的控制原理,指出了飞行器服役(作战)完整性发展的基础、研究方法以及目前我国航空航天领域急需研究和发展的方向。

关键词: 飞行器;服役(作战)完整性;概念;内涵;特性;表征;控制;发展

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.01

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Presentation and Development of Aerocraft Operational Integrity

HE Yuting

(School of Aviation Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aerocraft operational integrity (AOI) can be used to show the quality attribute of aircraft in the operational processes more comprehensively. Firstly, the concept presentation process of equipment operational integrity (EOI) is introduced, and the basic connotation and characteristics of AOI is discussed. The AOI which is the basis of usability and efficacy elaboration is expounded. Then, three characterizing parameters of AOI are introduced, including aircraft inherent readiness rate, aircraft inherent healthy degree, and aircraft operational integrity degree, and the primary optimum design method of AOI is discussed. Finally, the control principle of AOI is proposed, and the foundation and research methods of AOI which are the urgently necessary directions of AOI development and research in aeronautical and astronautically fields in our country are pointed out.

Key words: aerocraft; operational integrity; concept; connotation; characteristics; characterization; control; development

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(52175155); 国家科技重大专项(J2019-I-0016-0015)

通信作者: 何宇廷, heyut666@126.com

引用格式: 何宇廷. 飞行器服役(作战)完整性的提出与发展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 1-11.

HE Yuting. Presentation and development of aerocraft operational integrity[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 1-11. (in Chinese)

0 引言

飞行器作为一种复杂的装备,为了保障其安全可靠经济地服役使用,引入了通用质量特性参数如可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性等^[1-2]对飞行器在服役使用过程中所表现出来的固有质量特性进行定量描述,并希望通过通用质量特性参数提出定量要求的方法来对飞行器进行质量管理,以避免飞行器在服役使用过程中的灾难性事故的发生。尽管航空航天技术在不断进步,但事故总是与飞行器相伴,成为人类航空航天活动挥之不去的梦魇。例如,2007年11月2日,美军F-15战机由于机身大梁结构疲劳断裂,最终导致其在空中飞行时解体;2015年7月28日,从北京首都国际机场起飞的美国波音787客机,在飞越北京上空冰雹区时驾驶舱挡风玻璃受损严重,被迫折返并于同日返回北京首都机场;2018年5月14日,从成都双流机场飞往拉萨的3U8633航班A319客机,飞行中驾驶舱右座风挡玻璃脱落,副驾驶受伤,机组人员紧急下降后,成功返航;2020年4月26日,价值约2.9亿元的湾流G550私人飞机在成都双流机场停放期间,因场外事故导致的碎裂件飞入场内,砸中湾流飞机机翼,造成飞机严重受损^[3]。这些事故不仅导致飞机受损严重,而且修复时间与经济代价带来的损失也非常显著。

这些情况反映了一个不争的事实,那就是飞行器已有的各个通用质量特性,它们都是从某一个侧面反映服役过程中飞行器在某个方面的质量特性。即使在设计中对它们都做出了详细要求,也不能保证飞行器在整个服役使用过程中表现出很高的综合质量特性。特别地,有些通用质量特性在工程设计方法上有着相互矛盾的要求,在实际工作中无法实施。例如,高可靠性的要求,对于飞行器结构来说就要求大量采用一体化、整体化结构形式以减少疲劳薄弱部位;而高修复性^[4-5]的要求,对于飞行器结构来说又要求大量采用模块化、组合化结构形式以便在结构遭遇意外损伤或者战伤的情况下能够实现快速、经济地修复。显然,这在结构设计中是相互矛盾的要求,也就无法鱼与熊掌兼得了。

通俗地说,装备的功能是指装备能完成什么样的任务,发挥什么样的作用。装备实现功能的能力称为性能,主要以技术特性等来体现。装备的质量(Quality)就是装备的品质,反映装备满足

明确或隐含需要能力的特性总和,或者说是装备在实现功能的过程中所表现出来的固有特性满足要求的程度。用户对飞行器的要求就是要在整个服役使用过程中功能完善、性能稳定、使用方便、经久耐用。显然,飞行器在整个服役使用过程中的质量好坏应该应用综合性更强的质量特性参数来反映。何宇廷等^[6]给出了军用飞机作战完整性(Aircraft Operational Integrity,简称AOI)的概念。实际上,可以进一步将军用飞机作战完整性的概念应用于所有飞行器,称其为飞行器服役完整性,只不过对于军用飞行器更习惯称之为飞行器作战完整性。飞行器的服役(作战)完整性表示飞行器在服役(作战)使用全过程中保持完好和功能不退化的固有属性^[7]。如果功能满足要求,便于使用的飞行器在整个服役(作战)使用过程中能够保持完好和功能不退化,自然也就满足了飞行器要求其在整个服役使用过程中的功能完善、性能稳定、使用方便、经久耐用的要求。因此,可用飞行器服役(作战)完整性来对飞行器在服役(作战)过程中的质量特性进行更综合地表征。

飞行器服役(作战)完整性是在飞行器设计制造时赋予、服役使用过程中保持、全寿命周期内体现出来的飞行器的固有属性。本文对飞行器服役(作战)完整性的提出过程、概念内涵、表征控制以及持续发展等方面进行综述,以期将飞行器服役(作战)完整性的基本概念和相关结论推广应用于其他军民装备领域。

1 飞行器服役(作战)完整性的提出与概念

1.1 装备服役(作战)完整性的提出

完整性(Integrity)一词的原意是“保持完整且未分裂的状态”。事实上,人们对完整性的认识是从结构开始的。有了结构的失效问题就有了对结构完整性的要求,结构完整性可追溯到20世纪50年代。1954年彗星号客机连续两次坠入大海,使人们认识到了飞机结构疲劳的危害,促使了飞机结构完整性概念的出现^[8-10];同年,美国军方颁布的军用标准MIL-S-5710和MIL-S-5711,明确提出了飞机结构完整性的地面与飞行试验验证,这也是在美军标中首次出现“飞机结构完整性(Aircraft Structural Integrity)”的提法;1956年,《美国空军词典》中第一次给出了“结构完整性”的定义:

飞机结构抵抗设计载荷的属性^[11]；美国空军于 1959 年 2 月颁布了第一部正式的《飞机结构完整性大纲》(ASIP)，引入了抗疲劳设计理念，突破了原有的结构静强度设计思想，产生了质的飞跃。美军最新版的飞机结构完整性大纲是 2016 年发布的 MIL-STD-1530D^[12]。我国的飞机结构完整性大纲是 GJB 775. A—2012^[13]，目前正在改版中，给出了结构完整性的概念是指在要求的耐久性、安全性、结构能力和保障性水平下，结构保持完好及功能未受到削弱时所处的状态。2021 年，英国 TWI 咨询公司提出：结构完整性是工程学领域，结构或结构部件能满足正常服役条件下的要求并且是安全的，甚至在超过原来设计要求的条件下也是安全的^[14]，包括在可预见的寿命周期内支撑重量，防止变形、断裂和灾难性失效等。随着认识的发展，结构完整性的概念也是在不断发展丰富的。同时，从最初的飞机结构完整性被提出后，又相继提出了发动机结构完整性^[15]、航空电子设备完整性^[16]、机械设备完整性^[17]以及武器系统完整性^[18]和推进系统完整性^[19]等概念，并制定了相应的规范。完整性已成为装备/系统的一种固有属性。

然而，对于装备来说，即使结构或者某一个系统在装备的整个服役(作战)使用过程中都能保持其完整性，如果其他系统发生故障，装备也同样不能正常使用。因此，何宇廷^[20]提出了装备完整性的概念，其是装备保持完好及功能不退化的一种固有属性。从全寿命周期的角度来看，依据对装备战术、技术指标要求进行设计得到设计图纸，依据设计图纸生产制造得到产品，储存的产品交付给用户成为真正意义上的装备，装备在服役(作战)使用中发挥其功能特性，如图 1 所示。

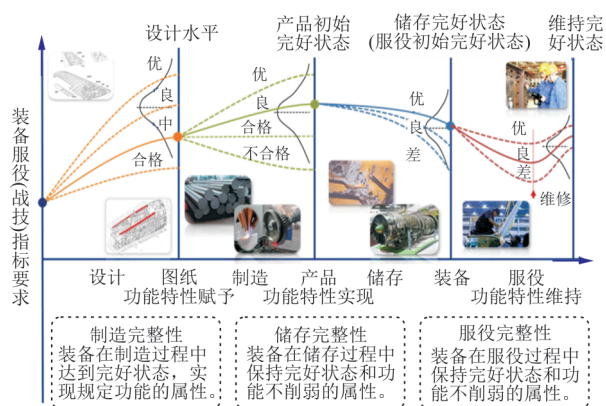


图 1 装备的全寿命周期特性

Fig. 1 Features along the life cycle time of equipment

可见装备的功能特性是在设计中赋予、在制造中实现、在服役中保持的。相应的，装备的完整性依据其全寿命周期的不同阶段可以划分为装备制造完整性、装备储存完整性和装备服役完整性(对于军用装备通常又称为装备作战完整性)。装备制造完整性是装备在制造过程中实现完整及规定功能特性的属性；装备储存完整性是装备在储存过程中保持完好及功能不退化的属性；装备服役(作战)完整性是装备在服役(作战)使用过程中保持完好及功能不退化的属性。如果装备制造完整性不好，则生产的产品废品率较高；如果装备储存完整性不好，则产品在储存期内失效或功能性能退化的几率较高；如果装备服役(作战)完整性不好，则装备在服役(作战)使用过程中失效或功能性能退化的几率较高。由于用户最关心的是装备在服役(作战)使用过程中的表现，因此装备服役(作战)完整性成为了研究的重点。由于所有装备都具有服役(作战)完整性，因此，服役(作战)完整性也可以看成是装备的另一个具有综合性的通用质量特性。

在分析研究装备服役(作战)完整性时，必须分析装备的主要服役(作战)使用流程。以军用装备为例，其流程可以概括为：装备集结，装备出动，装备开赴，装备进入(战场)，装备作战，装备撤离(战场)，装备返回^[20]。而后装备再集结进入下一个作战使用循环，直至战斗结束，如图 2 所示。

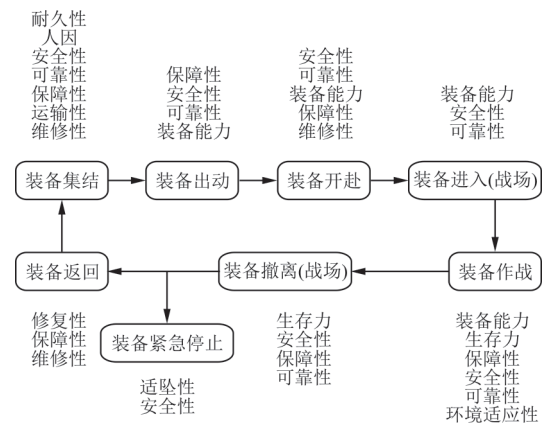


图 2 装备作战使用各阶段对装备特性的要求^[20]

Fig. 2 Requirement of characteristics in whole operational processes of equipment^[20]

装备服役(作战)完整性就是要求装备在整个作战使用循环中保持装备的完好以及功能不受到

削弱。要保持装备服役(作战)完整性,就需要装备的各个特性满足要求,特别是在装备服役(作战)使用各个阶段的一些关键核心特性要满足要求。例如,在装备集结阶段,首先就是要有足够可用的装备,这就对装备的耐久性(通常以装备的耐久性寿命来表征)提出了直接的要求。如果装备的耐久性差、寿命短,装备很快到寿退役,发生严重的“补不抵退”情况,部队装备出现大量的数量缺口,也就没有装备进行集结了。同理,装备在出动阶段的保障性,装备在向前线开进过程中的安全性,装备在进入作战战场时的完成任务的能力以及装备在作战阶段的生存力^[21-22](也翻译为“生存性”),装备在撤离战场阶段的生存力和装备在撤离战场返回基地后的修复性等特性指标也都显得至关重要了。同时,在现代作战环境下,装备及系统的电磁兼容性、体系兼容性等也显得非常重要。

因此,装备的服役(作战)完整性还可以给出另外两种定义^[20]:装备在服役(作战)使用过程中保持完好及功能未受到削弱的状态;装备在服役(作战)使用过程中,在要求的耐久性、保障性、安全性、任务能力、生存力、修复性、电磁兼容性以及体系兼容性等水平下,保持完好及功能未受到削弱的能力。实际上,装备的静态属性反映装备的状态,而装备的动态属性反映装备的能力。例如飞行器的静稳定性反映的是飞行器是否保持稳定的状态,而动稳定性反映的是飞行器受到扰动后恢复稳定状态的能力;结构在静载荷作用下的静强度问题本质上就是反映结构是否处于不破坏状态的问题,而在动态的交变载荷作用下的疲劳强度问题则是反映结构在多长时间期内能够保持不破坏状态的能力问题。因此,这里的装备的服役(作战)完整性的第一种表述也可以看作是装备的静态服役(作战)完整性的概念,而第二种表述则可以看作是装备的动态服役(作战)完整性的概念。

1.2 飞行器服役(作战)完整性的基本概念

飞行器作为一种复杂装备,在军民领域都有着广泛的应用。同样,完整性被认为是飞行器

质量的反映^[23]。在工程实际中,用户最为关注的是飞行器在服役(作战)使用过程中的表现。考虑到飞行器的特殊性,飞行器的质量特性包括气动特性、平台特性和电磁特性,飞行器服役(作战)完整性包括飞行器在服役(作战)使用过程中的气动完整性、平台完整性和电磁完整性。为了更综合地反映飞行器在服役(作战)使用过程中的质量特性,类似地可以得到飞行器服役(作战)完整性^[6-7]及其基本概念的三种不同表述:飞行器在服役(作战)使用过程中保持完好及功能不退化的属性;飞行器在服役(作战)使用过程中保持完好及功能未受到削弱的状态;飞行器在服役(作战)使用过程中,在要求的耐久性、保障性、安全性、气动能力、任务能力、生存力、修复性、电磁兼容性和体系兼容性等水平下,保持完好及功能未受到削弱的能力。在通常情况下,针对飞行器平台而言,气动能力与电磁兼容性等单列研究,不包括在内。第二种表述也可以看作是飞行器的静态服役(作战)完整性的概念,而第三种表述则可以看作是飞行器的动态服役(作战)完整性的概念。

2 飞行器服役(作战)完整性的内涵与特性

2.1 飞行器服役(作战)完整性的基本内涵

从飞行器完成服役(作战)任务的角度出发,飞行器服役(作战)完整性能更综合地反映飞行器在整个服役(作战)使用过程中的质量特性。对于军用飞行器,其服役(作战)使用过程包括作战任务的准备阶段(即训练阶段)、执行阶段和后续持续完成作战任务阶段。如果飞行器服役(作战)完整性差,也就是更综合地表明飞行器质量特性差,在整个服役(作战)使用过程中不能保持飞行器随时处于完好状态或者处于故障、损伤状态时不能及时恢复其完好状态,当然也就不能发挥其功能作用。因此,影响飞行器服役(作战)完整性的主要通用质量特性如耐久性(综合反映可靠性与经济性)、保障性、安全性、承载能力、生存性、修复性以及它们的综合影响等成为主要研究内容^[6-7]。如果这些特性较差,将直接导致飞行器不能有效地

用于完成作战任务,也将直接导致飞行器服役(作战)完整性差,其关系可以概略地表示如图 3 所示。

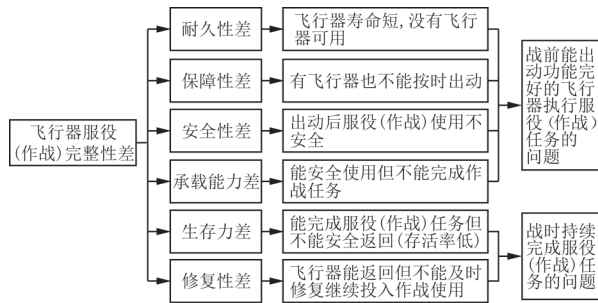


图 3 飞行器服役(作战)完整性差的体现
Fig. 3 Expression of weak aircraft operational integrity (AOI)

2.2 飞行器服役(作战)完整性的基本特性

飞行器服役(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^[6-7]。飞行器服役(作战)完整性的客观性是指飞行器服役(作战)完整性是客观存在的一种飞行器的属性,其可以通过特别的设计制造方法获得,并可以通过某些方法手段去度量。飞行器服役(作战)完整性的相对性是指飞行器服役(作战)完整性是与飞行器承担的作训任务和服役环境相对应,如果不对飞行器承担的作训任务和服役环境进行限定,则无法对飞行器服役(作战)完整性进行有效地描述与表征。飞行器服役(作战)完整性的随机性是指由于飞行器的质量特性、承担任务和服役环境的随机性导致飞行器服役(作战)完整性也具有随机特性。飞行器服役(作战)完整性的可控性是指,由于飞行器服役(作战)完整性是飞行器的一个固有属性,因此从飞行器设计、制造、试验和使用过程中总是可以通过一系列措施对其实施控制,使其在飞行器的服役(作战)使用过程中得到实现、维持和增长。

同其他装备一样,飞行器也具有服役(作战)完整性、服役(作战)适用性与服役(作战)效能三个顶层基本属性,分别反映飞行器在整个服役(作战)使用过程中“能用”“好用”“管用”的程度,如图 4 所示,可以看出:飞行器服役(作战)完整性是飞行器在服役(作战)使用过程中更综合的质量特性

的反映,也就是反映飞行器是否“能用”的问题。

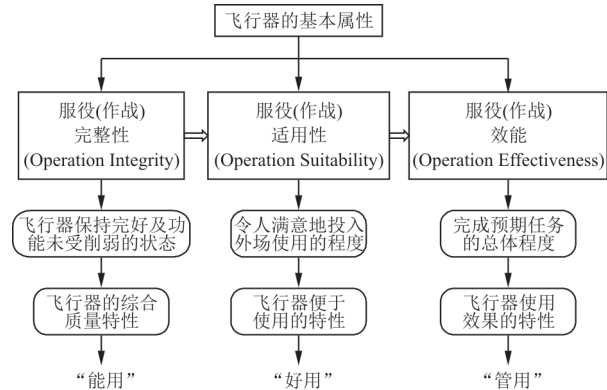


图 4 飞行器的三个顶层基本属性
Fig. 4 The top three basic attributes of aircraft

GJB 451A—2005《可靠性维修性保障性术语》给出了装备作战适用性的定义,类似地也可以得到飞行器作战适用性的定义,其核心是反映飞行器令人满意地投入外场使用的程度。可见,飞行器作战适用性就是反映飞行器是否适合外场方便使用的问题。飞行器服役(作战)效能是指飞行器在具有代表性的规定的人员使用下,在计划规定的或者预期的服役使用环境中(包括自然环境、电磁环境、战场威胁等)完成规定任务的总体程度。飞行器服役(作战)效能考虑的因素有编制、原则、战术、敌方威胁等,其核心是反映飞行器完成规定任务的程度,也就是反映飞行器在服役(作战)使用过程中是否管用

的问题。从上述分析可以看出,飞行器服役(作战)完整性是飞行器服役(作战)适用性与飞行器服役(作战)效能发挥的基础,体现飞行器在服役(作战)使用过程中更综合的质量特性,是通过飞行器设计赋予,制造实现,试验考核,并在服役(作战)使用中维持或者增长的飞行器的基本属性。飞行器服役(作战)完整性反映的是飞行器在服役(作战)使用过程中是否“能用”的程度。

3 飞行器服役(作战)完整性的表征与优化

3.1 飞行器服役(作战)完整性的表征

在实际工作中,飞行器的服役(作战)完整性可以用三个指标来度量表征。对于飞行器机群而言,飞行器服役(作战)完整性可以用飞行器的固

有完好率^[6-7,24]来直观反映。飞行器的固有完好率是指在规定条件下(包括使用环境、管理水平、保障条件等)机队某型飞行器在某时刻处于完好状态(或可以正常工作状态)的数量与机队某型飞行器总数量的比值,其可以用 R 表示。实际上,飞行器的固有完好率的数值在平时和战时可能是完全不一样的。

$$R = \frac{E_{\text{intact}}}{E_{\text{total}}} \quad (1)$$

式中: R 为飞行器的固有完好率(Inherent Readiness Rate,简称IRR); E_{intact} 为机队中处于完好状态的飞行器的数量; E_{total} 为机队中飞行器的总数量。

对于单架飞行器而言,飞行器服役(作战)完整性可以用飞行器的固有健康度^[24-25] $H(t)$ 来表征。飞行器的固有健康度是指飞行器在规定条件下保持完好(或正常工作)、功能未减弱的程度。

$$H(t) = 1 - \frac{L_a(t)}{L_c(t)} \quad (2)$$

式中: t 为时间参数; $H(t)$ 为以时间 t 为变量的飞行器的固有健康度(Inherent Healthy Degree),在0~1之间取值; $L_a(t)$ 为飞行器工作时的真实损伤程度; $L_c(t)$ 为飞行器失效时的临界损伤程度。

飞行器的整机损伤程度可以由组成飞行器的各个系统中最严重的某一个系统的损伤程度来代表,也可以由修复飞行器所需的总体维修工时或者维修费用来间接表征。

根据单机的健康度 $H(t)$ 可以计算出机群的完好率 R 。一般飞行器健康度的不同范围可以将飞行器的健康状态划分为不健康状态、亚健康状态和健康状态。飞行器在不健康状态需要马上进行修理,在亚健康状态需要制定修理计划为修理工作做准备,在健康状态时则不需要修理工作。可以认为,飞行器处于健康状态和亚健康状态时,能正常工作,即飞行器处于完好状;而当飞行器处于不健康状态时,不能正常工作,即飞行器处于不完好状。因此,可以得到机群中不完好飞行器与完好飞行器的数量,进而求得机群飞行器的完好率。可见,飞行器的完好率与健康度本质上是相通的。

飞行器服役(作战)完整性还可以用飞行器服役(作战)完整度 I_o 来进行表征^[6-7]。飞行器服役

(作战)完整度即为在规定的时间内、规定的条件下,飞行器执行规定任务时,飞行器可以保持完好及功能未受到削弱的概率,其也可以用飞行器完好度 U 、可用度 A 、安全度 S 、存活率 C 、生存率 S_u 和修复度 R_c 等来综合表征。其中,飞行器在服役(作战)使用过程中的气动完整性(或称为飞行器气动服役(作战)完整性)、体系兼容性和电磁完整性(或称为飞行器电磁服役(作战)完整性)影响上述相应的参数。飞行器服役(作战)完整度可以初步表示为

$$I_o = P\{\tau > t_0\} = f(U, A, S, C, S_u, R_c) \quad (3)$$

式中; t_0 为规定的时间; τ 为飞行器可以正常服役使用及功能未受到削弱的时间; U 为飞行器的完好度,进一步可以得到飞行器的损伤度 $D = 1 - U$,其是飞行器在达到规定时间 t 时所产生的耐久性损伤的表征; A 为飞行器的可用度,是指在一定的保障水平(人员、设备和备件等)下飞行器的可用程度; S 为飞行器的安全度,是飞行器安全性的概率表征; C 为飞行器的存活率,是飞行器可承受的负荷大于等于飞行器实际承受的负荷时不会引发飞行器发生失效破坏的概率,也可以相应地得到飞行器的失效破坏率 $F = 1 - C$; S_u 为飞行器的生存率,是飞行器生存性(或生存力)的概率表征; R_c 为飞行器的修复度(或称为恢复度),是飞行器修复性的概率表征^[4]。

飞行器的完好度、可用度、安全度、存活率、生存率和修复度之间的相互影响关系非常复杂。为了分析的简便性,飞行器服役(作战)完整性也可以简单地用式(4)表示。

$$I_o = U \cdot A \cdot S \cdot C \cdot S_u \cdot R_c \quad (4)$$

在上述飞行器服役(作战)完整性的三个表征指标中,也可以认为前两个指标表征了飞行器的静态服役(作战)完整性,后一个指标表征了飞行器的动态服役(作战)完整性。

3.2 飞行器服役(作战)完整性的优化

从飞行器服役(作战)完整性的度量表征模型可以看出,飞行器的耐久性、保障性、安全性、承载能力、生存力和修复性等严重影响飞行器服役(作战)完整性。飞行器服役(作战)完整性存在明显

的“木桶效应”。在影响飞行器服役(作战)完整性的各项特性参数中只要其中一项很差,那么飞行器的服役(作战)完整性就会受到严重的影响。极端的情况,如果某个特性参数取值为零,将导致飞行器服役(作战)完整性的值也为零。通常情况下,飞行器的装备资源(包括装备经费、装备设计水平、装备保障能力等)总是一定的,可以通过合理的资源调控和飞行器特性指标的合理设定,使得飞行器的 U 、 A 、 S 、 C 、 S_0 和 R_0 等参数指标相互协调,从而使飞行器服役(作战)完整度 I_0 达到最高值,实现飞行器服役(作战)完整性的最优化。

4 飞行器服役(作战)完整性的控制原理

4.1 飞行器服役(作战)完整性控制的概念

针对装备的服役(作战)完整性控制问题,何宇廷^[26]进行了初步讨论。飞行器作为一款复杂装备,可以对其服役(作战)完整性控制问题进行类似的讨论。飞行器服役(作战)完整性控制,就是在飞行器的设计/制造和服役/使用过程中为达到既定的服役(作战)完整性目标而开展的一系列活动过程的总称,其本质是对飞行器服役(作战)完整性的调整控制过程。

为了实现飞行器服役(作战)完整性的既定目标,对飞行器开展的设计优化、工艺优化、装备改装、飞行器定/延寿、全机试验考核评估、单机寿命监控(跟踪)^[27]、修理措施与计划调整、故障预测与健康管理等,装备更改(如部件修理、部件加强、部件更换等)、装备服役/使用计划调整、空/地勤人员培训与演练等工作本质上都属于飞行器服役(作战)完整性的控制活动。

4.2 飞行器服役(作战)完整性控制的内涵

飞行器服役(作战)完整性控制本质上就是控制飞行器的质量特性,其控制行为贯穿飞行器从设计到服役使用的全寿命周期。

同其他装备的服役(作战)完整性控制问题类似^[26],飞行器服役(作战)完整性控制的基本内涵或者基本任务包括飞行器服役(作战)完整性建

立、评估、验证、维持、恢复与增长等,如图5所示。

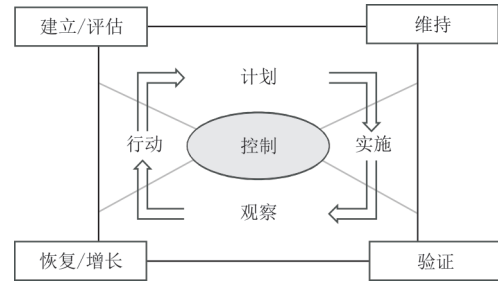


图5 飞行器服役(作战)完整性控制的基本内涵

Fig. 5 The basic connotation of AOI control

飞行器服役(作战)完整性是通过飞行器的设计、制造来建立的。交付使用的飞行器装备,其综合质量特性是一定的。飞行器服役(作战)完整性评估工作就是依据其三个表征参数进行分析评估。例如,对飞行器服役(作战)完整度 I_0 进行分析评估时,首先要进行飞行器的完好度 U 、可用度 A 、安全度 S 、存活率 C 、生存力 S_0 和修复度 R_0 等评估,然后再进一步对飞行器服役(作战)完整度 I_0 进行分析评估。

飞行器服役(作战)完整性验证工作实际上就是通过验证考核表征飞行器服役(作战)完整性的指标参数是否达到要求。例如,进行飞行器服役(作战)完整度 I_0 验证时,要对依据飞行器服役(作战)完整性分配的飞行器的完好度 U 、可用度 A 、安全度 S 、存活率 C 、生存力 S_0 和修复度 R_0 等进行验证考核。如果经过设计的上述各项特性参数都能达到要求,那么,飞行器服役(作战)完整度 I_0 也就达到要求了。

通常情况下,飞行器服役(作战)完整性随着飞行器的服役(作战)使用时间的推移,会逐步降低。只要在飞行器的服役(作战)使用过程中,其服役(作战)完整性不低于规定要求就是合理的。在飞行器的服役(作战)使用过程中,要使得飞行器服役(作战)完整性得以维持或保持,合理的维修是重要的手段。特别是现在正在发展的基于PHM系统的视情维修方式,是保持飞行器服役(作战)完整性的重要途径。

飞行器服役(作战)完整性的恢复/增长是在飞行器服役(作战)使用过程中根据其实际需求而进行的飞行器综合质量特性的恢复/提升活动。飞行器服役(作战)完整性的恢复/提升是可以通

过飞行器耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存性和修复性等通用质量特性的相互协调的恢复/增长来实现的。

4.3 飞行器服役(作战)完整性控制的策略

装备服役(作战)完整性大纲(EOIP)是在传统的飞机结构完整性大纲的基础上发展起来的。飞行器也是一款装备,飞行器的服役(作战)完整性控制策略也就是执行装备服役(作战)完整性大纲(EOIP)^[26],也可以改称其为飞行器服役(作战)完整性大纲(AOIP),如图6所示。其共有五个任务阶段,包括了飞行器组成的全系统,涵盖了飞行器的全寿命周期,体现了飞行器服役(作战)使用全流程。

任务一 设计资料	任务二 设计分析和研制试验	任务三 全尺寸试验	任务四 部队管理数据打包	任务五 部队管理与使用
EOIP主计划	材料 ^① 接头许用值确定	静力试验	合格审定分析	载荷谱/环境谱调查
结构设计准则	载荷分析	耐久性试验	强度总结	单机监控数据
损伤容限 ^② 耐久性过程	设计服务	损伤容限试验	部队结构维修计划	单机维修时间
材料选择 ^③ 连接方法	载荷谱设计	飞行 ^④ 地面操作试验	载荷谱/环境谱调查	结构维护记录
设计服务目标 和设计使用	化学/热环境谱	空气升学试验	单机监控程序	重量和平衡记录
质量特性	应力分析	飞行振动试验	战伤修复计划	战伤抢修
生存力设计资料	损伤容限分析	颤振试验	...	战伤评估与修理
修复性设计资料	耐久性分析	空气声学分析		训练
...	空气声学分析	试验结果的解释 ^⑤ 评估		...
	振动分析	载重 ^⑥ 平衡试验		
	颤振分析	实弹打击试验 (生存力、修复性)		
	核武器效应分析	...		
	非核武器效应分析			
	设计研发试验			
	质量特性分析			
	生存力设计分析			
	修复性设计分析			
	完整性分析			
	...			

图6 飞行器服役(作战)完整性大纲(AOIP)

Fig. 6 Schematics of aircraft operational integrity program (AOIP)

4.4 飞行器服役(作战)完整性控制的模式

装备服役(作战)完整性的控制模式有3种^[26],类似地,飞行器服役(作战)完整性的控制模式也有3种。

(1) 飞行器服役(作战)完整性的开环控制

在飞行器的服役(作战)使用过程中,随着服役时间的推移,飞行器服役(作战)完整性总会出现退化的情况。依据飞行器服役(作战)完整性的影响因素,可以在飞行器从设计制造到服役(作

战)使用的全寿命周期中,针对飞行器的耐久性、保障性、安全性、承载能力、生存性、修复性以及电磁兼容性等特性采取相应的增长措施,以实现飞行器服役(作战)完整性的保持或增长,这实际上就是飞行器服役(作战)完整性的一种开环控制行为。以安全性增长为例,至少可以通过以下7个方面实现飞行器的安全性增长^[26]:①提高可靠性;②引入健康监控技术;③提高维修水平;④增加检查次数;⑤加大修理深度;⑥加强安全性建设;⑦建设安全文化等。

(2) 飞行器服役(作战)完整性的协调控制

从前述分析可见,当单独采取耐久性、保障性、安全性、承载能力、生存性和修复性等增长措施时,由于这些特性存在着相互影响的关系,飞行器服役(作战)完整性不一定能够实现增长。要实现飞行器服役(作战)完整性增长,可以协调实施飞行器的耐久性、保障性、安全性、承载能力、生存性、修复性以及电磁兼容性等的增长,从而达到提高飞行器服役(作战)完整性的目标。依据影响飞行器服役(作战)完整性的各特性参数的不同组合,可以形成多种飞行器服役(作战)完整性控制方案。根据度量模型对每种相应的控制方案下飞行器服役(作战)完整度进行分析计算,以实现其最大化为目标,便可完成对飞行器服役(作战)完整性控制方案的优选。

(3) 飞行器服役(作战)完整性的权衡控制

在实际工作中,通过限制使用可以有效改善飞行器完成服役(作战)任务的条件,也就是对飞行器完成服役(作战)任务的能力要求降低,从而实现飞行器服役(作战)完整性的提高。需要明确指出的是,一般情况下,在实现飞行器服役(作战)完整性控制的同时,不能显著降低飞行器服役(作战)效能以及飞行器服役经济性。例如,在飞行器设计时显著增大结构的安全系数,可以有效提高飞行器服役(作战)完整性,但同时也增加了飞行器的空机重量,降低了飞行器的结构效能,这是不可选取的。因此,要在飞行器服役(作战)效能和飞行器服役经济性不大幅下降的前提下,以实现飞行器服役(作战)完整度最大化为目标,实施飞行器服役(作战)完整性的综合权衡控制。

5 飞行器服役(作战)完整性的持续发展

5.1 飞行器服役(作战)完整性发展的基础

飞行器的服役(作战)完整性实际上是在飞行器服役(作战)使用过程中面对故障、失效等而发展起来的,涉及材料缺陷、设计缺陷、制造缺陷、意外损伤、严酷的服役条件、损伤修复等多个方面。其研究发展基础包括数学、材料、力学、物理学、化学等基础学科,航空航天工程、环境工程、可靠性工程、维修保障工程、安全性工程、生存性工程、修复性工程、电子工程、系统工程等工程学科以及优化设计技术、综合权衡技术、仿真分析技术、试验验证技术、失效分析技术、维修保障技术、火力防护技术、战伤评估与修理技术等应用技术。这些方面的发展反过来又将推动飞行器的服役(作战)完整性向前发展。

5.2 飞行器服役(作战)完整性研究的方法

飞行器服役(作战)完整性以其在整个服役(作战)使用过程中完成服役(作战)任务的角度为出发点,对其必须从五个维度进行研究:装备组成全系统、装备服役(作战)全体系、完成任务全流程、维持控制全寿命、质量特性综合化。也就是说,飞行器服役(作战)完整性必须以飞行器整机为研究对象,任何一个系统失效或者故障都将导致其不完好,不能完成预定功能任务。飞行器服役(作战)完整性的研究必须从单机扩展到任务装备体系,只有从体系兼容、体系联通、体系增强等角度进行研究,才能把握飞行器服役(作战)完整性的本质。飞行器服役(作战)完整性必须从飞行器全任务流程进行研究,才能准确把握飞行器服役(作战)完整性需要研究的内涵。飞行器服役(作战)完整性的维持、控制活动必须在飞行器的全寿命周期内进行,才能真正实现飞行器服役(作战)完整性在整个服役(作战)使用过程中的最优。飞行器服役(作战)完整性是飞行器在服役(作战)过程中更综合的质量特性的反映,必须对飞行器相关通用质量特性在飞行器整个服役(作战)使用过程中执行并完成服役(作战)任务的综合影响进行研究。

5.3 飞行器服役(作战)完整性发展的方向

飞行器服役(作战)完整性控制的内涵主要包括建立、评估、验证、维持、恢复与增长5个方面。因此可以从这5个方面简要分析飞行器服役(作战)完整性发展的紧迫方向。

飞行器服役(作战)完整性是通过设计制造建立的。在设计方面,在飞行器总体设计中,应该制定服役(作战)完整性控制大纲,并从体系兼容性的角度进行服役(作战)完整性指标权衡和服役(作战)完整性优化设计;在飞行器结构/推进系统结构设计中,应该考虑意外损伤/战伤的影响、意外损伤/战伤结构强度分析以及结构修复性设计等;在飞行器机械系统设计中,应该考虑复合损伤/二次毁伤影响;在飞行器电子系统设计中应该考虑防电磁脉冲攻击、增强电磁兼容性;在飞行器武器系统设计中应该加强抗敌方干扰设计等。在飞行器的制造中应该提高工艺水平,避免加工损伤。

飞行器服役(作战)完整性的评估方面应该在飞行器服役(作战)完整性表征模型与评估方法方面加强研究。关于飞行器服役(作战)完整性表征模型,目前的研究还是初步的,各影响参数之间的相互影响关系还没有相应的研究工作。飞行器气动服役(作战)完整性、飞行器电磁服役(作战)完整性以及装备体系兼容性对飞行器服役(作战)完整性的影响等这些都是今后要研究发展的重点。

飞行器服役(作战)完整性的验证方面应该在研制试验与评价(DT&E)、实弹打击试验与评价(LFT&E)、作战使用试验与评价(OT&E)三个方面研究试验验证问题。特别是采用实弹打击的测试方法对军用飞行器的生存性和修复性进行考核与评价,在我国还没有实质性开展。

飞行器服役(作战)完整性的维持方面应该进一步加强新型的维修保障技术,例如基于健康监测的视情维修技术将对服役(作战)使用过程中的飞行器服役(作战)完整性的维持有着非常重要的作用。

飞行器服役(作战)完整性的恢复与增长方面应该重点研究飞行器在意外损伤或战伤情况下的经济、快速修复技术以及对抗作战环境的火力防护技术等。这些工作在我国初步开展,急需重点发展。

6 结束语

(1) 本文在回顾装备服役(作战)完整性提出过程的基础上,概述了飞行器服役(作战)完整性的提出与基本概念,说明了飞行器服役(作战)完整性能更综合地反映飞行器在服役(作战)使用过程中的质量特性。

(2) 讨论了飞行器服役(作战)完整性的基本内涵,主要包括飞行器耐久性、保障性、安全性、承载能力、生存性、修复性、电磁兼容性、体系兼容性等以及它们的综合影响。介绍了飞行器服役(作战)完整性的基本特性,客观性、相对性、随机性和可控性;明确了飞行器的服役(作战)完整性是飞行器服役(作战)适用性与服役(作战)效能发挥的基础。

(3) 介绍了飞行器服役(作战)完整性的三个表征参数:飞行器固有完好率、飞行器固有健康度、飞行器服役(作战)完整度,前两个参数反映飞行器的静态服役(作战)完整性,最后一个参数反映飞行器的动态服役(作战)完整性;并说明了可以利用飞行器服役(作战)完整性达到最优来实现飞行器的优化设计。

(4) 提出了飞行器服役(作战)完整性的控制原理,包括飞行器服役(作战)完整性控制的概念、内涵、策略和模式。飞行器服役(作战)完整性控制的基本内涵或者基本任务包括服役(作战)完整性的建立、评估、验证、维持、恢复与增长等;飞行器服役(作战)完整性控制的基本策略是执行飞行器服役(作战)完整性大纲(AOIP);飞行器服役(作战)完整性控制的基本模式包括开环控制、协调控制、权衡控制等。

(5) 介绍了飞行器服役(作战)完整性发展的基础,包括相关基础学科、工程学科以及应用技术等方面。提出了飞行器服役(作战)完整性发展的方向,包括飞行器服役(作战)完整性建立所依赖的飞行器设计制造方面,以及飞行器服役(作战)完整性的评估、验证、维持、恢复与增长等方面是目前我国急需发展的方向。

飞行器服役(作战)完整性是一个新的概念,属于装备通用质量特性的范畴,其更综合地反映了飞行器在服役(作战)使用过程中的质量特性,它的引入将为飞行器的设计理念、制造技术、试验方法、使用策略和维修保障等带来新的发展。但

研究工作还是初步的,有很多工作需要继续深入进行。飞行器服役(作战)完整性的基本概念和相关结论同样可以推广应用于其他军民装备。

参考文献

- [1] 甘茂治, 吴真真. 维修性设计与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
GAN Maozhi, WU Zhenzhen. Maintainability design and verification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [2] 何宇廷. 飞行器安全性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
HE Yuting. Safety engineering of aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [3] 简星堰. 川籍首富浮沉录——买飞机时豪气干云霄[N/OL]. (2021-02-27)[2022-01-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1692774887411538036&wfr=spider&for=pc>.
JIAN Xingyan. The richest man from Sichuan recorded the ups and downs when he bought a plane[N/OL]. (2021-02-27)[2022-01-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1692774887411538036&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese)
- [4] 何宇廷. 飞行器的修复性及其设计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 1-8.
HE Yuting. Aircraft recoverability and its design methods[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 1-8. (in Chinese)
- [5] HE Yuting. On the evaluation and design methods of structural recoverability [C] // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology. Jeju: Aeronautical and Astronautical Society, 2021: 1-5.
- [6] 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 operational integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 1-7. (in Chinese)
- [7] HE Yuting. On aircraft operational integrity [C] // 32nd Congress of the Aeronautical Sciences. Shanghai: International Council of the Aeronautical Sciences, 2021: 1-7.
- [8] 林建鸿, 王彬文. 飞机疲劳失效适航规章演变历程回顾[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3): 39-51.
LIN Jianhong, WANG Binwen. Evolution history of airworthiness regulations for aircraft structural fatigue designs[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(3): 39-51. (in Chinese)
- [9] LIN J. Durability and damage tolerance analysis methods for lightweight aircraft structures: review and prospects[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufac-

- ture, 2022, 5(2): 224-250.
- [10] 崔德刚, 鲍蕊, 张睿, 等. 飞机结构疲劳与结构完整性发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 66-87.
CUI Degang, BAO Rui, ZHANG Rui, et al. Development of aircraft structural fatigue and structural integrity: review [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 66-87. (in Chinese)
- [11] 焦志强, 舒成辉. 飞机结构完整性设计思想的发展和标准的演变[J]. 航空标准化与质量, 2010(1): 21-24.
JIAO Zhiqiang, SHU Chenghui. Development of aircraft structural integrity design ideas and standards [J]. Aviation Standardization and Quality, 2010(1): 21-24. (in Chinese)
- [12] USA Department of Defense. Aircraft structural integrity program (ASIP): MIL-STD-1530D[S]. USA: USA Department of Defense, 2016.
- [13] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构完整性大纲: GJB 775. A—2012[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012.
The General Equipment Department of PLA. Structural integrity program of military aircraft: GJB 775. A—2012[S]. Beijing: The General Equipment Department of PLA, 2012. (in Chinese)
- [14] The Welding Institute (TWI). What is structural integrity and why is it important?[EB/OL]. [2022-01-27]. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/structural-integrity>.
- [15] USA Department of Defense. Engine structural integrity program (ENSIP): MIL-STD-1783[S]. USA: USA Department of Defense, 1984.
- [16] USA Department of Defense. Avionic integrity program (AVIP): MIL-STD-1796A[S]. USA: USA Department of Defense, 2011.
- [17] USA Department of Defense. Mechanical equipment and subsystems integrity program: MIL-STD-1798C [S]. USA: USA Department of Defense, 2013.
- [18] USA Department of Defense. Weapon system integrity program: MIL-HDBK-515 [S]. USA: Department of Defense, 2013.
- [19] USA Department of Defense. Propulsion system integrity program: MIL-STD-3024 [S]. USA: Department of Defense, 2008.
- [20] 何宇廷. 装备的作战完整性初探[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(1): 1-8,31.
HE Yuting. A study of equipment operational integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 1-8,31. (in Chinese)
- [21] 李曙林, 常飞, 何宇廷. 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 Shulin, CHANG Fei, HE Yuting. Survivability analysis and evaluation of military aircraft in operational use[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [22] 张建华. 飞机战伤抢修工程学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
ZHANG Jianhua. Aircraft battle injury emergency repair engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [23] 王立群. 航空飞行器的完整性[J]. 航空学报, 1988, 9(10): 433-439.
WANG Liqun. Aircraft equipment integrity[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(10): 433-439. (in Chinese)
- [24] 何宇廷. 飞行器服役(作战)完整性对结构疲劳断裂设计分析的新要求[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3): 31-38.
HE Yuting. New requirements of structural fatigue & fracture design and analysis based on aircraft operational integrity [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(3): 31-38. (in Chinese)
- [25] 何宇廷. 飞行器健康状态的表征及应用[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 1-8.
HE Yuting. Study on characterization method of aircraft health status[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 1-8. (in Chinese)
- [26] 何宇廷. 装备的作战完整性控制原理[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(3): 1-5.
HE Yuting. On the control theory of equipment operational integrity [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(3): 1-5. (in Chinese)
- [27] 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 Yuting, ZHANG Teng, MA Binlin. 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)

作者简介:

何宇廷(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器结构寿命控制、结构健康监控与飞行器服役(作战)完整性。

(编辑:丛艳娟)