

文章编号: 1674-8190(2023)05-001-07

# 基于作战完整性的军用飞机结构强度 发展思考

何宇廷, 张腾, 缙百勇

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 飞机结构作战完整性是一个综合性较强的结构通用质量特性, 是飞机结构发挥作战适用性和作战效能的基础, 主要包括耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存性和修复性6方面的特性, 且相同的结构设计技术对6方面特性的影响可能不同。为实现飞机结构作战完整性的提升, 通过对飞机结构作战完整性概念及作战特点的分析, 从结构作战完整性6个主要方面特性的角度出发, 探讨了其对飞机结构强度的发展需求, 并分析了典型结构设计技术对飞机结构作战完整性的影响, 以期对飞机结构强度的相关分析提供参考和依据。

**关键词:** 飞机结构强度; 作战完整性; 耐久性; 保障性; 安全性; 结构能力; 生存性; 修复性

中图分类号: V215.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.01

## Opinions on the development of military aircraft structural strength based on aircraft structural operational integrity

HE Yuting, ZHANG Teng, GOU Baiyong

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

**Abstract:** As a general quality characteristic with comprehensive feature, the aircraft structure operational integrity (ASOI) is the basis for aircraft structure to exert its operational applicability and effectiveness. The ASOI includes six mainly characteristics, such as durability, supportability, safety, structural capability, survivability and recoverability. The same structural design techniques may have different effects on the six mainly characteristics. In order to improve the ASOI, the development requirements of aircraft structural strength are discussed from the perspective of six mainly characteristics of ASOI, which is based on the analysis of ASOI meaning and aircraft combat characteristics. In addition, the influence of typical structural design techniques on ASOI is also analyzed, which is used for providing the basis for the relate analysis of aircraft structural strength.

**Key words:** aircraft structural strength; operational integrity; durability; supportability; safety; structural capability; survivability; recoverability

收稿日期: 2023-04-01; 修回日期: 2023-06-23

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, 张腾, 缙百勇. 基于作战完整性的军用飞机结构强度发展思考[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 1-7.

HE Yuting, ZHANG Teng, GOU Baiyong. Opinions on the development of military aircraft structural strength based on aircraft structural operational integrity[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 1-7. (in Chinese)

## 0 引言

飞机结构的完好状态对军用飞机的作战使用具有重要影响。伴随着航空史上的系列飞行事故,飞机结构设计思想经历了静强度设计和静、动强度设计,20世纪50—60年代出现了抗疲劳设计,20世纪70年代出现了破损安全、耐久性和损伤容限设计,现阶段飞机的设计思想已经发展为结构完整性设计阶段<sup>[1-2]</sup>。

目前,我国军用飞机在设计中贯彻飞机完整性大纲<sup>[3]</sup>,以保证日常训练过程中的飞行安全和保持正常的机群规模。但传统的飞机结构完整性大纲主要以训练条件为背景,在作战背景下并不能完全满足需要,亟需考虑真实的战场环境和战场威胁下飞机结构在耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存性和修复性方面的性能,即飞机结构作战完整性<sup>[4-5]</sup>。

飞机结构作战完整性是一个综合性较强的结构通用质量特性<sup>[6]</sup>。为实现飞机结构作战完整性的提升,必须对其涉及的各方面能力综合考虑、权衡分析。为此,本文基于作战完整性视角,从耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存性和修复性6个方面,对军用飞机结构强度的发展需求进行分析,论述了各特性之间的相互关系,以期为相关的分析工作提供参考。

## 1 飞机结构作战完整性的概念

飞机结构的作战完整性是指飞机结构在作战使用过程(作战准备/训练和作战实施)中保持完好及功能不退化的属性,是飞机结构发挥作战适用性和作战效能的基础<sup>[7]</sup>。

通俗地讲,飞机结构的作战完整性、作战适用性和作战效能反映了飞机结构在作战使用过程中“能用”“好用”“管用”的程度。以生活中的刀具为例,在对其适用的对象进行切削时容易发生崩裂、卷刃,就是其“作战完整性”不好的表现;针对不同的切削对象,刀具的“趁手”程度不同,就反映了其“作战适用性”的好坏(如使用菜刀削苹果就不趁手);而锋利的刀具顺利地完成了切削任务,则反映了其“作战效能”的好坏。只有刀具保持完好,首先“能用”,才能谈得上后续的“好用”和“管用”。

军用飞机结构作战完整性是通过设计赋予,

通过制造固化,通过服役使用体现的飞机结构固有属性,外场可由结构固有完好率、结构固有健康度和作战完整度<sup>[8]</sup>反映。

需要说明的是,结构完好率与两方面因素有关,一是飞机结构自身保持功能完好的能力,二是维修保障资源(包括装设备、人员、备件等)的建设水平和投入程度<sup>[9]</sup>。在维修管理活动中对保障资源的建设和检查是为了提升结构完好率的外在影响因素。而为了实现飞机结构固有能力的提升,则必须从设计、制造过程中对其作战完整性水平进行优化。

在对飞机结构的作战完整性进行研究时可以结合耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存力、修复性6个主要特性及其相互关系进行综合分析。

## 2 飞机结构作战完整性对结构强度的发展需求

从飞机结构作战完整性的内涵来看,其是在整个作战任务阶段保证作战飞机机队规模、正常出动、安全使用、完成作战任务、战场存活和持续出动的基础。

确保战前出动完好的飞机参加作战任务需要考虑飞机结构的耐久性、保障性、安全性、结构能力;而确保飞机结构在战时持续完成作战任务需要在上述基础上考虑生存性和修复性,如图1所示。

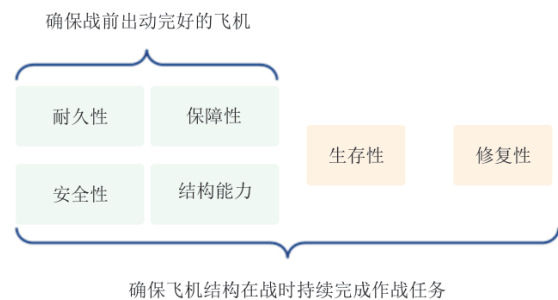


图1 飞机结构作战完整性的内涵

Fig. 1 Connotation of aircraft structural operational integrity

在作战条件下,对军用飞机的准备时间要求短、保障环境恶劣、技术标准放宽、人员技术种类和备件供应要求降低<sup>[10]</sup>。飞机作战时不可避免地会受到战场损伤,与结构强度相关的主要损伤形式有切槽、脱落、残余应力、窝坑、破孔、变形、裂缝、表面伤、烧伤、折断、缺口、磨损、连接松动、卡

滞等<sup>[11]</sup>。

上述特点使飞机结构作战完整性在研究内涵上与传统的结构完整性相比更加丰富。为确保飞机结构在作战环境下正常使用,基于做完整性视角,对飞机结构强度的发展也带来了新的挑战。

## 2.1 耐久性对结构强度的需求

耐久性是指飞机结构在规定的时间内抵抗开裂、腐蚀、热退化、分层、磨损和普通外来物损伤的能力<sup>[3]</sup>。耐久性的好坏决定飞机结构的服役使用寿命,从而在装备采购经费和训练任务一定的情况下影响了机队规模的大小。

飞机结构耐久性设计是指根据结构的设计使用年限、环境类别及作用等级,采取合理的措施,保证结构在使用寿命期间不出现功能性损伤的设计。耐久性设计包括选择耐久性材料、控制应力水平和应力集中、结构细节优化设计、选择抗疲劳工艺、选择腐蚀防护和热防护措施、质量控制和管理等方面<sup>[12-13]</sup>。

面向作战使用,飞机结构的耐久性问题面临新的挑战,特别是在作战准备(也可称之为实战化训练)阶段尤为突出。例如,高强度训练、大载荷飞行带来的大损伤问题,恶劣环境下服役导致的结构腐蚀问题,左边界飞行引发的结构振动问题等。

针对上述结构耐久性问题,在设计方面,复合材料的选用、整体结构的设计、细节部位的强化等措施具有更广阔的应用前景;在管理方面,飞机结构单机寿命监控、服役使用计划调控、腐蚀预防与修理、放宽使用寿命限制等寿命控制活动越来越受到研究者的关注。

针对战伤结构,目前的主流观点是战伤修理后结构强度应满足静强度和刚度要求<sup>[11]</sup>。但即使是恢复结构的短期任务能力,针对裂纹、缺口等易诱发开裂的损伤,也应对其进行简易处理,如打止裂孔、挫修、圆弧过渡、补强等<sup>[11]</sup>。面向持续周期较长的作战任务,针对战伤修理的耐久性要求值得进一步探讨。

## 2.2 保障性对结构强度的需求

飞机结构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<sup>[6]</sup>。保障性的好坏影响了飞机的出动率,从而在装备保障资源一定的情况下影响了飞机的可出动架次。

为保证飞机在寿命期内高效、低故障率的出勤和便捷的维修保障,必须重视和加强其保障性设计<sup>[14]</sup>。飞机的保障性设计目的是使飞机具有可保障和易于保障的设计特性。一些设计理念对结构强度提出了相应的要求。例如,可达性设计希望飞机上的口盖越多越好、口盖的开启越方便越好,在结构强度方面涉及了开口结构的传力设计、快开口盖的连接强度分析、大口盖的加强、复合材料结构的开口等问题。

随着装备自保障理念的提出和贯彻发展,对飞机结构的故障预测与健康(PHM)能力提出了新的要求。结构PHM系统采用先进的传感器实时监控飞机结构的健康状态,并借助相应的算法来诊断、预测、监控和管理飞机结构的工作状态<sup>[15-16]</sup>。

基于PHM的飞机结构健康状态分析可直接应用于放飞决策及损伤监测,从而有效缩短对飞机结构的检查时间、降低检查难度;了解和预测结构损伤情况,从而在合适的时机采取合适的维修活动,开展精准的人员、备件、工具耗材和资料准备;此外,有效的损伤定位和预测减少了突发性损伤导致的停机时间,有效提升了飞机结构的保障性。

## 2.3 安全性对结构强度的需求

飞机结构的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<sup>[6]</sup>。

结构的损伤容限设计可以通过采用多传力路径构件或止裂件,优化细节设计、材料选择和应力水平控制等措施,提供缓慢的裂纹扩展速率和较强的剩余强度能力;增加结构(特别是关键结构)的可检度,保证对裂纹具有足够高的检出概率,使之可及时开展维修以保证其使用安全<sup>[12]</sup>。

面向作战使用,飞机战伤结构的安全性是指飞机结构战场抢修(或经战伤评估认定可不进行修复直接放飞)后再次执行任务是否安全。其安全性取决于是否对关键部位的战伤进行了准确的



评估和修复,再次出动时结构的强度和刚度是否满足任务要求。面向不同的飞行任务,战伤结构和修复后结构的最低可接受安全度取值需要进一步探讨。

目前,针对战伤结构和修复后结构的损伤容限评定技术,快速、有效、安全的战伤修理技术,面向不同任务的战伤飞机放飞准则等已成为战伤抢修工作中亟需研究突破的关键问题,这些都是飞机战时安全对结构强度专业提出的新课题。

## 2.4 结构能力对结构强度的需求

飞机的结构能力是指结构是否满足任务要求的能力<sup>[6]</sup>,由于结构的基本功能是进行承载和传力,因此,结构能力一般指结构的强度(包括静强度和动强度)、刚度问题,也包含结构的一些特殊功能,如密封性、透光性、电磁屏蔽特性等。

针对飞机结构的静强度要求,采用限制载荷(即服役中预期的最大载荷)和极限载荷(限制载荷乘以规定的安全系数,即设计载荷)来规定。在限制载荷作用下,不应超过材料的屈服应力;在极限载荷作用下,不应超过材料的极限应力。安全系数的取值最低取 1.5,当存在结构强度不易确定、结构强度在服役中可能降低、结构强度受工艺等不确定因素影响大的情况时,还需考虑附加的安全系数<sup>[12]</sup>。

飞机结构动强度是指结构在动态载荷和动力环境下,承受振动和冲击而不破坏并保持安全工作的能力。飞机结构在变形过程中会出现结构振动,除了弹性力和气动力,还有大小和方向随时间而变化的惯性力的作用,这种振动在一定条件下会导致结构失去动稳定性<sup>[17]</sup>。为此,GJB 67.6A—2008 规定,在考虑 15% 余量的全飞行包线范围内不应发生颤振、嗡鸣、抖振、气动伺服弹性不稳定性和其他气动弹性不稳定现象<sup>[12]</sup>。

针对飞机结构的强度和刚度设计,国内外根据先进军用飞机的特点开展了较多的研究。目前,在结构能力设计方面,重点还应考虑结构能力与其他设计要求的协调,如结构能力与耐久性、保障性、安全性、生存力、修复性等指标的权衡;此外,结构能力中的强度、刚度与其他结构能力要求也应协调考虑,如复合材料虽然在承载能力上具有优越的性能,但具有透波的特点,在电磁屏蔽、防御电磁脉冲武器攻击等方面具有先天不足,在

不同部位的选用上应综合考虑。

## 2.5 生存性对结构强度的需求

飞机结构的高生存性设计是为了适应战场环境中的任务和生存需要提出的<sup>[18]</sup>。飞机的生存性是指飞机在执行作战任务时,在不引起持久地削弱其完成指定任务能力的前提下,躲避和承受人为敌对环境的能力<sup>[19]</sup>。生存性一般包括敏感性和易损性两个基本要素,从广义生存性的角度出发,还包括了威胁有效性<sup>[20]</sup>。

结构生存性是飞机生存性的重要研究内容,与结构强度相关的生存性设计主要与易损性减缩设计相关<sup>[21]</sup>。例如,优先选用具有高韧性、强抗损能力的材料,对易受战伤结构部位进行加强,减少使用损伤容限较低的整体结构,优化结构布置减小易损面积或增加对关键部位的遮挡,优化关键连接结构、功能结构的余度设计,对关键核心部位加装防护等。

为支撑上述设计内容,还应注重飞机战伤关键部位和关键结构件的确定、结构战伤模式预测及损伤影响评估、战伤后结构的传力分析与剩余强度评估等内容研究。这些研究涉及了结构强度领域与结构毁伤领域的高度融合。

在结构生存性研究中涉及了战伤结构的剩余强度评估,其作用是评估结构受到不同程度的战伤后是否仍能发挥承载作用,属于结构生存性研究中的重要内容。实际上,战伤结构的剩余强度评估与结构损伤容限设计中涉及的剩余强度评估在方法上并没有本质的区别,只是战伤结构的损伤不像疲劳裂纹那样规则。在战伤结构剩余强度评估工作中要实现传统断裂力学的应用,关键问题是应确定可以代表战伤尺寸的等效裂纹尺寸。

## 2.6 修复性对结构强度的需求

飞机的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意外损伤或者非常规损伤(如事故损伤、战斗损伤、鸟撞损伤、冰雹损伤、工具跌落损伤、外来物冲击损伤等)进行修复时,恢复到规定任务能力状态的能力<sup>[22]</sup>。飞机的修复性也可以称为恢复性(Recoverability),是通过飞机的设计、制造过程固化到飞机上的固有属性。

战伤飞机如果不修就等于战损,如果未得到及时修复的战伤飞机累积的越来越多,则飞机的

可用规模则会越来越少<sup>[23]</sup>。飞机是否具有容易修复的特性由修复性表征,因此,修复性的好坏决定了战时飞机的再次出动能力。

如果在飞机设计时能较好地考虑修复性问题,在总体设计、结构布局、装配工艺等方面采取便于修复的措施,并且设计配置合理的修复保障资源,则飞机损伤修复保障的效率就会更高。

在结构修复性设计上,通常可采用模块化设计、互换性设计、标准化设计、可达性设计、测试性设计、修复工艺设计等<sup>[22]</sup>。好的修复性设计具有便于战伤检查和修理的结构布局,主要结构元件具有能迅速检查、修理或更换的性质,如图 2 所示。

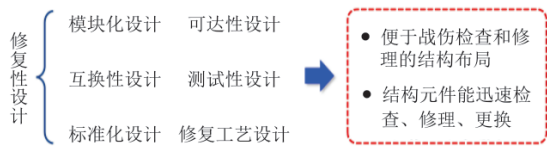


图 2 修复性设计  
Fig. 2 Restorative design

因此,修复性设计希望在结构上的检修口盖和维修分离面越多越好、结构零件越通用越好、结构修理所需的保障资源越少越好,这些要求均与结构强度专业息息相关。

### 3 飞机结构作战完整性各特性间的相互关系

飞机结构作战完整性由耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存性和修复性 6 个特性决定,各个特性之间既有一致性,也有矛盾性,例如,结构生存性好的飞机,各种伪装、防护措施越多,损伤修复越困难,修复性必然会降低;但同时,生存性好的飞机,抗战伤能力强,损伤量减少,在相同的战场环境下修复工作量减小。为更好地分析飞机结构作战完整性各特性间的相互关系,针对几个典型的飞机结构设计技术,从耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存性、修复性 6 个方面,初步探讨了其对飞机作战完整性的影响,如表 1 所示。

表 1 基于作战完整性视角的典型飞机结构设计技术分析  
Table 1 Analysis of typical aircraft structural design techniques based on operational integrity perspective

典型结构设计技术	对结构作战完整性的影响					
	耐久性	保障性	安全性	结构能力	生存性	修复性
整体结构设计	接头连接减少,应力分布均匀,耐久性提升	检查量减少,零件减少,便于开口,保障性提升	危险部位减少,但裂纹扩展难抑制,影响不确定	空间利用率提高,动强度性能提高,结构能力提升	有效减重,机动性提高,生存性提升	维修分离面减少,难于更换战伤部位,修复性降低
碳纤维复合材料	耐腐蚀,抗疲劳,受外物冲击影响大,易分层,耐久性总体上提升	难于开口,修理工艺复杂,保障条件和技术要求高,保障性降低	止裂能力较强,但在外场对损伤难检测,安全性总体上提升	有效减重,抗拉强度较高,但抗压强度较弱,影响不确定	破损安全能力强,但抗穿透能力弱,电磁屏蔽能力差,影响不确定	难于开口,修复工艺难,对设备、耗材和技术要求高,修复性降低
多传力路径设计	疲劳危险部位增多,耐久性降低	检查量增加,拆装难度大,保障性降低	破损安全能力强,安全性提升	影响不确定	破损安全能力强,生存性提升	拆装难度大,修复难度大,修复性降低
结构 PHM 系统	对耐久性无影响。但通过准确判定结构状态,优化维修策略,耐久性寿命提升	损伤快速定位,预防性维修工作时间和放飞检查时间减少,保障性提升	通过损伤状态监测,可在断裂前及时预警,从而采取合适维修,安全性提升	对结构能力无影响	对结构生存性无影响	对结构内部的损伤提供辅助判断,修复性提升

从表 1 可以看出:相同的结构设计技术,对飞机结构作战完整性各特性的影响效果可能完全不同,即使是对同一特性,影响效果也可能存在提升

方面有所降低的情况。

针对结构设计技术使作战完整性某一特性降低的情况,一方面,可以探索新的技术与之配合,

实现对原有技术的优化<sup>[24]</sup>,例如,多传力路径设计可以使安全性和生存性有效提升,但同时会使结构保障性与修复性降低,可以重点对其配套的快速拆装方法、检查措施开展技术攻关,使结构保障性与修复性得以改善,仍可以作为重要的结构设计技术;另一方面,可以根据不同的结构设计技术的特点对其应用部位进行优化,从而发挥其最大效益,例如,碳纤维复合材料在结构减重、强度提升方面效果好,但难于开口、电磁屏蔽能力差,对保障性、生存性和修复性有不良影响,可以在无需开口、内部无电子设备的结构部位优先选用,如平尾等,规避其不足。

从上述分析可以看出,为实现结构作战完整性的优化,在结构设计技术选择时应进行系统的分析与评估,相应的表征与评估方法可参考文献[4-6]。还应注意的是,对结构作战完整性的优化需要结合飞机的类型和作战用途有针对性地进行分析。例如,歼击机的主要任务是与敌机进行空战,夺取空中优势,歼击机战时出动量大、机动动作大、战场威胁多,对飞机结构作战完整性的整体要求较高,需保持各特性均衡;强击机和武装直升机主要用于战场支援,多用于对地面目标进行打击,需要具有较高的生存性和修复性;运输机是用于运送军事人员、武器装备和其他军用物资,对于前线运输机,在结构安全性、生存性、修复性等方面应重点关注,对于支援运输机,在结构安全性、生存性等方面应重点关注等。

## 4 结束语

本文从飞机结构作战完整性的角度出发,进行了结构强度发展的初步思考。通过对飞机结构作战完整性概念及作战特点的分析,从耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存性和修复性6个方面,探讨了飞机结构作战完整性对结构强度的发展需求。

飞机结构作战完整性的6个特性之间既有一致性,也有矛盾性。在进行结构设计技术选择时,需要从作战完整性的角度对其进行综合分析,从而实现飞机结构作战完整性的优化。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构完整性大纲: GJB 775A—2012[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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.
- [7] 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.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 孙璐璐, 滕曰, 黄锐. 飞机完好率预测仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(8): 71-75.
- [10] 张均勇. 飞机战伤抢修性设计及其评价的研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

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)

JIAO Zhiqiang, SHU Chenghui. The development of aircraft structural integrity design ideas and the evolution of standards [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2010 (1): 21-24. (in Chinese)

People's Liberation Army General Armaments Department. Military aircraft structural integrity program: GJB 775A—2012[S]. Beijing: People's Liberation Army General Armaments Department, 2012. (in Chinese)

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)

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)

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)

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

HE Yuting, BAO Rui. On the theory of aircraft structural operational integrity control [C]// The 31th ICAF Symposium. Xi'an: ICAF, 2023: 1-10.

SUN Lulu, TENG Yue, HUANG Rui. Simulation of aircraft readiness rate prediction [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(8): 71-75. (in Chinese)

ZHANG Junyong. Study and apply on the design and estimation method of aircraft combat resilience [D]. Shenyang:



- Northeastern University, 2012. (in Chinese)
- [11] 张建华. 飞机结构战伤抢修[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
ZHANG Jianhua. Aircraft structure war damage repair[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构强度规范 第6部分: 重复载荷、耐久性和损伤容限: GJB 67.6A—2008[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008.  
People's Liberation Army General Armaments Department. Military airplane structural strength specification Part 6: repeated loads, durability and damage tolerance: GJB 67.6A—2008[S]. Beijing: People's Liberation Army General Armaments Department, 2008. (in Chinese)
- [13] 李玉海, 王成波, 陈亮, 等. 先进战斗机寿命设计与延寿技术发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 50-76.  
LI Yuhai, WANG Chengbo, CHEN Liang, et al. Overview on development of advanced fighter life design and extension technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 50-76. (in Chinese)
- [14] 谢婧. 飞机结构保障性设计与评估[J]. 中国新通信, 2019, 21(7): 151.  
XIE Jing. Aircraft structural supportability design and evaluation[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(7): 151. (in Chinese)
- [15] 王海峰. 战斗机故障预测与健康管理技术应用的思考[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 3-11.  
WANG Haifeng. Research on application of prognostics and health management technology for fighter aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2020, 31(7): 3-11. (in Chinese)
- [16] 王彬文, 肖迎春, 白生宝, 等. 飞机结构健康监测与管理技术研究进展和展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 30-41.  
WANG Binwen, XIAO Yingchun, BAI Shengbao, et al. Research progress and prospect of aircraft structural health monitoring and management technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 30-41. (in Chinese)
- [17] 李秋彦, 李刚, 魏洋天, 等. 先进战斗机气动弹性设计综述[J]. 航空学报, 2020, 31(6): 37-63.  
LI Qiuyan, LI Gang, WEI Yangtian, et al. Review of aeroelasticity design for advanced fighter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 31(6): 37-63. (in Chinese)
- [18] 王斌团, 吕锦锋, 党蒲妮. 飞机结构作战生存力设计要素与评估研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 50-58.  
WANG Bintuan, LYU Jinfeng, DANG Puni. Research on design factors and assessment for aircraft structures combat survivability[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 50-58. (in Chinese)
- [19] 裴扬, 宋笔锋, 石帅, 等. 飞机作战生存力分析方法研究进展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 216-234.  
PEI Yang, SONG Bifeng, SHI Shuai, et al. Analysis method of aircraft combat survivability: progress and challenge [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 216-234. (in Chinese)
- [20] 何宇廷. 飞行器广义生存性及评估方法[J]. 航空学报, 2022, 43(6): 185-193.  
HE Yuting. On the generalized survivability of aircraft and its evaluation method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(6): 185-193. (in Chinese)
- [21] 裴扬, 宋笔锋, 李占科. 飞机易损性评估的基本方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(2): 70-74.  
PEI Yang, SONG Bifeng, LI Zhanke. Research on the aircraft vulnerability assessment method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(2): 70-74. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 祖光然, 裴扬, 侯鹏. 飞机战伤抢修评估与设计方法综述[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 87-108.  
ZU Guangran, PEI Yang, HOU Peng. Review of aircraft battle damage assessment and repair estimation and design technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 87-108. (in Chinese)
- [24] 王向明. 飞机新概念结构设计与工程应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 1-7.  
WANG Xiangming. New concept structure design and engineering application of aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2020, 31(4): 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,结构健康监测与飞行器服役(作战)完整性。

张腾(1987—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器结构寿命控制与服役(作战)完整性。

缙百勇(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向:飞行器结构寿命控制与服役(作战)完整性。

(编辑:丛艳娟)