

装备的作战完整性控制原理

何宇廷

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 从装备完成作战任务的角度出发,可以用装备的作战完整性来表征装备在作战使用过程中的综合质量特性。为了实现对装备综合质量特性的有效控制,提出了装备作战完整性控制的基本概念,即在装备的设计制造和作战使用过程中为达到既定的作战完整性目标(一定的装备作战完整度或者装备完好率)而开展的一系列活动过程。明确了装备作战完整性控制的基本目标,并阐述了 3 种基本控制模式——开环控制、协调控制、权衡控制。在阐明装备作战完整性控制的基本内涵的基础上,提出了实现装备作战完整性控制的基本途径——制定、贯彻和实施作战完整性大纲,阐述了作战完整性大纲包含的 5 个任务段:设计资料、设计分析和研制试验、全尺寸试验、部队管理数据打包和部队管理与使用,并对实施装备作战完整性大纲的主要目的进行了简明分析。

关键词 作战完整性;装备;控制原理

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.03.001

中图分类号 V215.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)03-0001-05

On the Control Theory of Equipment Operational Integrity

HE Yuting

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract In view of completing equipment operation tasks, the comprehensive quality attribution of the equipment can be characterized in the process of operations by the Equipment Operational Integrity (EOI). In this study, the concept of the Equipment Operational Integrity Control (EOIC) is put forward to control the comprehensive quality attribution of equipment effectively. The EOIC is a series of activities carried out in the process of equipment design/manufacture and service/usage to achieve the established operational integrity objectives (a certain set of durability, supportability, safety, performance, survivability and recoverability, or a certain equipment operational integrity degree, or a certain equipment readiness rate). And then, the goals of EOIC and the three basic equipment operational integrity control modes, the open-loop control, coordinated control and balanced control, are analyzed as well as the connotation of EOIC. Furthermore, the basic ways to perform the EOIC are gained, which are establishment and implementations of the Equipment Operational Integrity Program (EOIP). Finally, the objectives of the EOIP are discussed briefly, including Design Information, Design Analysis and Development Tests, Full Scale Testing, Force Management Data Package and Force Management.

Key words operational integrity; equipment; control theory

收稿日期: 2019-10-28

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. 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.

用户对装备或产品的质量要求就是要在服役使用过程中性能稳定、经久耐用。在以往的工作中人们用可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性等来表征装备在服役使用过程中的通用质量特性^[1]。但是,这些通用质量特性参数都是从某一个侧面去反映装备在某个方面的特性,而且彼此之间的关系也没有很好地进行关联。文献[2]提出用装备的作战完整性来表征装备的综合质量特性(对于产品可称为使用完整性),是装备通用质量特性的综合反映。

本文在文献[3~5]的基础上,对装备的作战完整性控制开展了进一步探讨。文献[3]提出了飞机结构完整性的控制,就是在飞机的设计/制造和服役/使用过程中为达到既定完整性目标(耐久性、保障性、安全性和结构能力)而开展的一系列活动过程,其本质就是对飞机结构完整性的调整控制过程。因此,可以类似地给出装备作战完整性控制的基本概念:装备的作战完整性控制,就是人们在装备的设计制造和作战使用过程中为达到既定的作战完整性目标(一定的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性或者一定的装备完好率)而开展的一系列活动过程,其本质就是对装备作战完整性的调整控制过程。

在装备投入使用之前,使用先进的设计技术可以为装备的作战完整性奠定良好的基础,使其具备“优秀基因”,装备的作战完整性主要是设计出来的,是通过合理的设计赋予了装备的作战完整性;使用先进的制造加工技术可以提高装备的质量品质,锻造其“强健体格”,因此说装备的作战完整性也是制造出来的,是通过制造加工固化到装备上的。对于已交付使用的装备,其基本质量品质可以认为是一定的。但是,服役环境、作训条件、装备负荷强度和维修保障能力等对装备的作战完整性具有重大的影响,可以说装备的作战完整性更是使用出来的,是在作战使用过程中得以保持的,并通过作战使用而体现出来的。因此,通过一系列的控制手段可以实现装备作战完整性的最大化。

1 装备作战完整性控制的基本目标

装备的作战完整度模型可以简单表达为^[2]:

$$I_0 = UASCS_u R_c \quad (1)$$

根据式(1)反映出的装备作战完整性存在“短板效应”。式中的各项参数只要其中一项很差,那么装备的作战完整性就会受到很大的影响,便会导致装备的作战完整性差。同时,这也反映出,在资源一定的条件下(如经费、设计水平、保障能力等),可以通

过合理的资源调控,使装备的完好度、可用度、安全度、存活率、生存率和修复度指标相互协调,从而使装备的作战完整度达到最高。

由此可以看出,装备作战完整性的控制目标就是在装备的设计制造和作战使用过程中,对装备耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等各方面的特性进行综合调制,使装备的完好度、可用度、安全度、存活率、生存率和修复度等指标相互协调匹配,从而使装备的作战完整性达到最优,装备的作战完整度 I_0 达到最高值。

需要说明的是,装备的作战完整性控制就是对装备的综合质量特性进行控制,也就是对装备耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等各个侧面的质量特性要求的综合权衡过程。实际上,装备各个侧面的质量特性所要求的工作内容往往是不一致的,甚至是互相矛盾的。例如,从耐久性的要求出发,往往希望将装备进行一体化或者整体化设计,这样可以使装备在平时的使用过程中故障少,可靠性高,并且经久耐用,经济性好;但是,从修复性的要求出发,往往希望将装备进行模块化设计,这样可以使装备在战时的使用过程中受到战伤时便于快速修复。为了使装备的作战完整性这个综合质量特性最优,就必须综合权衡,反复迭代。

2 装备作战完整性控制的基本模式

2.1 装备作战完整性的开环控制

在装备的作战使用过程中,由于各种因素,装备的作战完整性不免会出现下降。根据装备作战完整性的特点,在装备的设计制造和服役使用过程中,可以采取一系列的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性增长措施,以增长装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性,从而实现装备作战完整性的保持或增长,如图1所示。

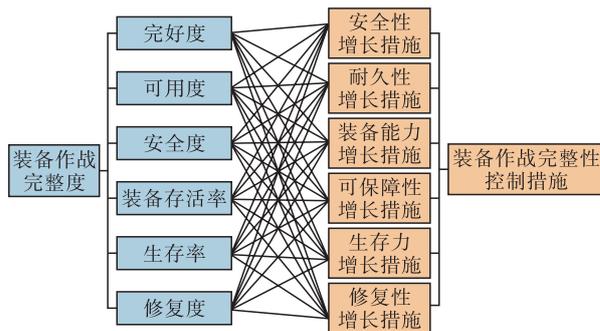


图1 各项控制措施对装备作战完整度的影响

耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性增长措施均对应有多种方法,即可以通过多种途径实现增长。以安全性增长为例,至少可以通过

以下几个方面实现:①提高飞机的可靠性;②引入健康监控技术;③提高航空维修水平;④增加检查次数;⑤加大修理深度;⑥加强安全性制度建设;⑦建设安全文化等等。

2.2 装备作战完整性的协调控制

在上述实现安全性增长的途径中,加大修理深度能够实现安全性和耐久性的增长;提高装备维修水平可实现安全性和保障性的增长;引入健康监控技术在实现安全性增长的同时会制约保障性的增长。可以看出,上述安全性增长措施不仅实现了安全性增长,也对耐久性和保障性产生了影响。同理,耐久性、保障性、安全性和装备能力的增长措施均会对其他特性的增长产生或多或少的积极的或消极的影响。

因此,以单独增长耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性出发,采取耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存力和修复性的增长措施,不一定能够实现所期望的装备作战完整性的增长。要实现装备作战完整性的增长,必须以装备作战完整度最大化为目标,协调实施耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存力和修复性的增长。对于多种耐久性、保障性、安全性、结构能力、生存力和修复性增长措施,将其组合可以形成多种装备作战完整性控制方案,每种方案对装备作战完整度各个参数有不同的影响,从而对装备作战完整度产生不同的影响,应根据式(1)对每种方案的装备作战完整度进行计算,以装备作战完整度最大化为目标,完成对装备作战完整性控制方案的优选,见图 2。

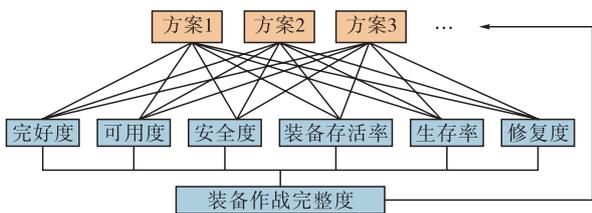


图 2 控制方案对装备作战完整度的影响示意图

2.3 装备作战完整性的权衡控制

根据装备作战完整度的概念,通过限制使用,可以改善任务条件,或者降低装备完成任务能力的要求,从而使装备作战完整度得到提高。但是,在以装备作战完整度最大化为目标实施结构完整性控制时,在非必要的情况下,不能以大幅损害装备作战效能和经济性为代价。例如,对于装备的结构平台,在设计时增大安全系数、大幅加强防护体系,可以提高结构完整性,但同时增大了结构质量系数,降低了结构效能,故不应推荐。因此,要在结构效能和经济性不大幅下降的前提下,以结构完整度最大化为目标,实施结构完整性综合权衡控制。

3 装备作战完整性控制的基本内涵

装备作战完整性是装备综合质量特性,装备的作战完整性控制就是对装备的质量特性进行综合控制。其基本内涵或者基本任务包括装备的作战完整性建立、评估、验证、维持、恢复与增长等,见图 3。

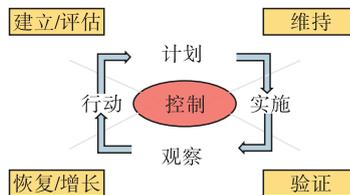


图 3 装备作战完整性控制的基本内涵

3.1 装备作战完整性建立

装备的作战完整性是通过装备的设计、制造来建立的。设计制造完成并调试合格的装备,其综合质量特性已经确定。制造工艺流程也是设计好的,只要按设计要求进行加工制造,就能保证装备的制造质量。装备的作战完整性主要是由装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等确定。因此,装备的作战完整性设计也就是针对装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等进行的综合设计,主要包括:①针对装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等进行单项设计,给出相应的设计方案;②依据作战完整性的整体要求再对装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等进行协调设计;③在需要的时候还要对装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等进行迭代设计,以达到设计要求。由于要达到装备的单项通用质量特性参数要求,有时需要不同的设计方法手段甚至是相反的设计方法手段,所以协调设计变得不可避免。如针对装备的结构而言,耐久性设计往往需要对结构采取整体结构设计方法,但结构的修复性设计则要求采用模块化结构设计方法;结构的安全性设计与结构的有效承载能力要求往往也不一致。设计工作需要反复迭代、综合权衡,才能最终达到装备的作战完整性最优的设计结果。

3.2 装备作战完整性评估

装备的作战完整性评估首先是进行装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性评估。然后依据装备的作战完整性模型对装备的作战完整性进行评估(装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等评估模型在文献[2]中已详细介绍,装备的作战完整性的度量模型可用式(1)的完整度表达式进行表征分析,或者用装备的完

好率来表征分析,具体可参见文献[2])。装备作战完整性的评估主要依据相关试验结果或者实际作战使用数据进行,在缺乏试验或者使用数据时,也可以采用仿真的方法进行评估,待到有试验数据或者实际作战使用数据时再进行校对更正。

3.3 装备作战完整性验证

装备的作战完整性验证工作包括装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性试验验证等。如果经过设计的上述各项装备特性都能达到要求,那么,装备的作战完整性也就达到了要求。

美国军方将装备试验与评价分为研制试验与评价(DT&E)、实弹打击试验与评价(LFT&E)、作战使用试验与评价(OT&E)3类^[6-7]。研制试验与评价是在研制阶段依据合同对装备系统性能指标的试验验证与评价;实弹打击试验与评价主要是采用实弹打击的测试手段对武器装备的作战效能、适用性和生存力(或者生存性)的考核与评价,并为装备的改进设计提供依据;作战使用试验与评价是典型用户在作战使用时,对武器装备的各个性能、特性参数的考核与评价。美军在这一方面已经形成了一套成熟的作战试验与评价理论、实践和方法体系。

装备的作战完整性、作战适用性和作战效能都是通过这3类试验来验证的,其关系见图4。

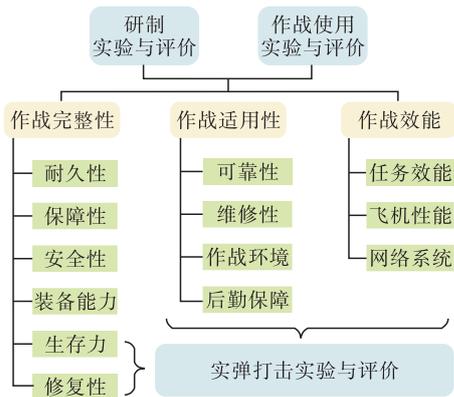


图4 装备属性的试验验证

对于装备的作战完整性试验,研制试验工作通常是由装备研制单位负责进行,主要是通过实验室的手段来考核装备的耐久性、保障性、安全性、承受负荷的能力等是否达到设计要求。装备的实弹打击试验通常是由军方组织完成,主要是考核装备在实装实弹打击的条件下生存力和修复性是否满足设计要求。而装备作战使用环境下的真实的综合质量特性只有在实际的作战使用过程中才能体现出来,是作战使用试验。也就是说,装备的作战完整性最终是通过作战使用试验来验证。

3.4 装备作战完整性维持

装备设计制造完毕交付到部队使用时,其作战

完整性或者说其综合质量特性是一定的。在装备的服役使用过程中,其作战完整性是会逐步降低的。要保持或维持其原有的作战完整性,只能是通过装备的维修来实现。特别是视情维修,是保持装备作战完整性的有力手段。通过视情维修,既可以排除影响装备作战完整性的故障,又能减少对装备的不必要拆解,避免了对装备作战完整性产生负面影响的维修活动。

3.5 装备作战完整性恢复/增长

装备的作战完整性恢复/增长是在装备服役使用一段时间后根据装备的综合质量特性需求需要而进行的装备质量恢复/提升活动,装备的作战完整性恢复/增长就是对装备的综合质量进行恢复/提升。装备的作战完整性恢复/提升是通过装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性的协调恢复/增长来实现的,只有装备的这些通用质量特性得到相互协调的恢复/增长才能实现装备的作战完整性恢复/增长。如果只强调某一方面的恢复与提升,有时可能还要起到相反的效果。比如,如果只强调装备的耐久性增长(如可靠性、经济性的增长)而忽略修复性的影响(有时需要采取的措施是相矛盾的),则可能导致装备最终的作战完整性得不到增长,有时反而是降低的,此点必须注意。在实际工作中,装备的作战完整性恢复/增长可以通过改进理论分析方法、改进装备设计或者加大维修深度等措施来实现。

4 装备作战完整性控制的基本途径

为了保证装备的综合质量而开展的装备优化设计、工艺流程优化、系统改装、装备定/延寿、单机寿命监控(跟踪)、设计更改(修理、加强、原组件更换等)、服役/使用计划调整、维修措施与计划调整等,其本质就是对装备作战完整性的调整控制过程。

要实现装备的作战完整性控制,其基本途径就是制定、贯彻和实施装备作战完整性大纲。受到飞机结构完整性大纲的启发,装备作战完整性大纲是通过涵盖设计、研制、和装备管理全流程的5个基于时间顺序的任务段来组成实现的:①设计资料——满足装备设计目标的各项设计准则的选取与确定;②设计分析和研制试验——装备的作战使用环境的表征以及装备的作战使用分析、各系统的设计分析与试验等;③全尺寸试验——实验室试验、实弹打击试验与作战使用试验,以确定评估设计分析的准确性;④部队管理数据打包——确定部队在役装备使用管理方法及装备在使用中的进一步鉴定评估方法(如检查、维修、

调整更改、损伤评估、风险分析等);⑤部队管理与使用——执行部队在役装备的使用管理方法以确保每台装备在服役使用过程中的作战完整性。前 3 个任

务段关心的是装备作战完整性大纲主计划的贯彻与实施,后面 2 项任务是为保持装备单机的作战完整性而推荐的使用管理程序方法,见表 1。

表 1 装备的作战完整性大纲

任务 1 设计资料	任务 2 设计分析和研制试验	任务 3 全尺寸试验	任务 4 部队管理数据打包	任务 5 部队管理与使用
EOIP 主计划	材料 & 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 & 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 & 连接方法	载荷谱设计	飞行 & 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	单机监控程度	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	战伤抢救
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	空气声学试验		训练
……	空气声学分析	试验结果的解释 & 评估		……
	振动分析	载重 & 平衡试验		
	颤动分析	实弹打击试验(生存力、修		
	核武器效应分析	复性)		
	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			
	……			

实施装备作战完整性大纲的主要目的是:确定与装备作战安全性、适用性和效能相适应的装备作战完整性要求;建立、评估、验证、保持、恢复、增长装备的作战完整性;获取、评估、利用使用数据对装备单机的作战完整性进行持续评估;为确定后勤保障和部队计划需求提供基础(如维修、检查、供应、装备轮换、系统升级和未来装备的实体化实现等);为发展未来装备系统的设计、评估、实体化实现的方法、准则提供基础。

5 结论

1)提出了装备作战完整性控制的基本概念,即人们在装备的设计制造和作战使用过程中为达到既定的作战完整性目标(一定的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性或者一定的装备完好率)而开展的一系列活动过程,本质就是对装备作战完整性的调整控制过程。

2)明确了装备作战完整性控制的基本目标,并阐述了 3 种基本控制模式——开环、协调、权衡控制。

3)对装备作战完整性控制的基本内涵(建立、评估、验证、维持、恢复、增长)进行了简明分析。

4)提出了实现装备作战完整性控制的基本途径,即制定、贯彻和实施作战完整性大纲,阐述了作

战完整性大纲包含的 5 个任务段:设计资料、设计分析和研制试验、全尺寸试验、部队管理数据打包和部队管理与使用,并对实施装备作战完整性大纲的主要目的进行了分析。

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.
- [2] 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.
- [3] HE Y T, ZHANG T, MA B L, et. al. Structural Integrity Control Technology Based on Structural Damage Monitoring[C]//ICAF 2019 Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing. Cham: Springer International Publishing, 2019:938-955.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 董健,陈桂明. 装备作战适用性试验和评价理论[J]. 研究科技视界,2013(5):99-100.
- [7] Program Office. Test and Evaluation Master Plan[Z], Version 3.0,2015-11-16.

(编辑:姚树峰)