

装备的作战完整性初探

何宇廷

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 传统装备通用质量特性如可靠性、维修性等均是从不同侧面反映装备的某一方面的质量特性。从装备完成作战任务的角度出发, 提出了装备作战完整性——装备在作战使用过程中, 在要求的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性水平下, 装备保持完好(或可以正常使用)及功能未受到削弱的属性, 并以此表征装备在作战使用过程中的综合质量特性。装备作战完整性与作战适用性、作战效能一起构成了装备的3个基本属性, 分别反映了装备在作战使用过程中是否“能用”“适用”“管用”的程度。进而对装备作战完整性内涵与表征方法进行了探讨, 特别是对装备耐久性、生存力与修复性的概念、度量方法进行了较为仔细的阐述, 并提出了装备承载能力-负荷干涉模型进行描述装备由于能力不足而引起的失效概率问题。

关键词 装备; 作战完整性; 耐久性; 保障性; 安全性; 装备能力; 生存力; 修复性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.01.001

中图分类号 V215.1 文献标志码 A 文章编号 1009-3516(2020)01-0001-08

A Study of Equipment Operational Integrity

HE Yuting

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

Abstract The universal quality characteristics of traditional equipment, such as reliability, maintainability, etc., can be characterized by the quality characteristics in a certain aspect of an equipment from different sides. In order to analyze the equipment quality, some parameters are put forward, such as Reliability, Maintainability, safety, Supportability etc. But, each of these parameters only reflects one attribute of the equipment partially. Hence a compound parameter is necessary to show the comprehensive quality attribute of the equipment during the operational process. In this study, an Equipment Operational Integrity (EOI) is put forward, and defined as the attribute existence when equipment is sound and unimpaired while providing the desired level of equipment safety, performance, durability, supportability, survivability and recoverability. Then, a quantitative measurement method is proposed, which uses Equipment Operational Integrity Degree (EOID) to measure EOI, $I_o = f(U, A, S, C, S_u, R_c)$, linearly simplified as $I_o = UASC - S_u R_c$. And I_o is evaluated based on durability degree U , availability degree A , safety degree S , livability degree C , survivability degree S_u and recoverability degree R_c . Also, the Equipment Readiness Rate R can be used to express EOI, $R = E_{intact} / E_{total}$, here E_{intact} is intact equipment amount and E_{total} is total equipment amount. And the connotation of the EOI is discussed in details, which reveals that the Equipment Operational Integrity tells if the equipment is capable to operate, the Equipment Operational Suitability tells if

收稿日期: 2019-08-23

基金项目: 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初探。E-mail:heyut666@126.com

引用格式: 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. HE Yuting. A Study of Equipment Operational Integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 1-8.

the equipment is suitable to operate, the Equipment Operational Effectiveness tells if the equipment is effective to operate, and all of them compound the three basic attributes of equipment. Meanwhile, the durability, survivability and recoverability of equipment are explained carefully, including the concepts and measurement methods. And the interference model of equipment Capability-Load is presented to show the equipment failure probability due to the weak load-bearing capabilities comparing with the acting loads during equipment operating process.

Key words equipment; operational integrity; durability; supportability; safety; performance; supportability; survivability; recoverability

装备在服役使用过程中的通用质量特性有可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性等^[1]。但是,它们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阐述。其实,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。因此,可以寻求装备或产品综合质量特性的参数来对其综合质量特性进行表征。装备综合质量特性往往是在设计制造时赋予、在服役使用过程中保持、在全寿命周期内体现出来的装备属性。可以将这个装备的综合质量特性称为作战完整性(Operational Integrity),对于产品可以称为产品的使用完整性。装备的作战完整性与装备的作战适用性、作战效能一起构成装备的 3 个基本属性。装备的作战完整性反映装备在作战使用过程中的综合质量特性,作战适用性反映装备投入外场使用的满意程度,而作战效能则反映装备在作战使用过程中完成既定任务的程度。

1 装备作战完整性的基本概念

1.1 装备作战完整性概念的提出

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 MIL-STD-1530D,与之相比,我国最新的 ASIP 是 GJB 775. A—2012。

完整性一词后来成为表征飞机质量特性的一个重要概念^[2],最初被提出的是飞机结构完整性,而后又衍生发展出发动机结构完整性^[3]、航空电子设备完整性^[4]和机械设备及子系统完整性^[5]等,在飞机功能系统级的完整性上,则有武器系统完整性^[6]和推进系统完整性^[7]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(或保持完好)及功能未受到削弱时所处的状态。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的综合质量特性。笔者在文献[8~9]中提出军用飞机结构作战完整性概念的基础上,在文献[10]中给出了军用飞机作战完整性的概念。实际上,可以进一步将作战完整性的概念应用于所有装备。因此,装备的作战完整性可以表述为:装备在作战使用过程中,在要求的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性水平下,装备可以正常使用(或保持完好)及功能未受到削弱时所处的状态。作战完整性也可以表述为:装备在规定的时间内,在规定的服役使用条件下(包括储存条件、作战使用条件和维修保障条件等),执行规定任务(或完成规定功能)时,装备保持完好或功能不退化的固有状态属性。装备的作战完整性反映的是装备在作战使用过程中的综合质量特性。

装备的作战完整性是从装备完成作战任务的角度出发,综合反映装备在整个作战使用过程中的质量特性。作战使用过程既包括准备作战(训练)过程,也包括执行作战任务过程以及持续完成作战任务过程(即多次重复执行作战任务直至完成作战任务的过程)。如果装备的作战完整性差,也就是其综合质量特性差,具体表现在装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等较差,将直接导致装备不能有效地用于完成作战任务。

对于装备作战完整性与装备传统“六性”等的关系可以简单分析如下:装备“六性”是指可靠性、安全性、维修性、测试性、保障性和环境适应性,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,分别从不同的侧面反映了装备的基本特性,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^[11]。总的来说,装备作战完整性中的 6 项指标要求在装备传统“六性”中均有体现。但两者相比,装备通用质量特性是以装备质量为牵引的,反映装备通用质量水平的一系列度量,每个度量表明装备某一个方面的质量特性;而装备作战完整性的应用特点更为鲜明,是以装备完成作战

任务的能力为牵引,增加了装备的生存力和修复性指标,是反映装备能否顺利用于完成作战任务的综合质量特性,是装备可用状态的一种度量。因此,可以看出,装备作战完整性与装备传统“六性”等既相互联系,又有各自的鲜明特点,不能互相代替。

1.2 装备的生存力、耐久性与修复性

生存力(或生存性)是指装备在执行作战任务时,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。即装备在作战时,在敌方武器威胁的环境下,应具有尽量不被敌人发现即低的探测敏感性、遭到敌方武器攻击后减少致命损伤即低的易损性的能力。因此,装备的敏感性和易损性是决定装备生存力的2个主要因素。

装备生存力是设计赋予装备的固有属性,对提高装备训练和作战效能有着突出的贡献,是装备战斗力的重要组成部分。在作战阶段,装备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冲击。因此装备的抗武器损伤能力和抗坠撞能力的好坏决定了装备生存力的大小。

装备的耐久性是指装备在服役使用过程中抵抗由于环境、负荷以及意外损伤等引起失效破坏的能力,为装备是否经久耐用的特征反映。通常可以用耐久性寿命来表征装备的耐久性,即装备再修理时已经不经济或者装备出现重大损伤危及使用安全时装备所达到的服役使用周期。在实际应用中,一型装备的耐久性寿命通常还要求具有高可靠度,以保证装备在作战使用中安全可靠地运行;或者说,在装备规定服役使用条件和耐久性使用周期内,其可靠性水平也就表示了其耐久性程度。也可以说,装备的耐久性是装备的可靠性与经济性的综合反映。

装备的修复性是指装备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功能状态的能力。装备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^[12-13]。装备修复性的好坏反映在2个方面,一是在发生损伤,尤其是非常规损伤时装备是否容易被修复,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,装备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,装备修复就不划算了,此时就认为该装备不可修复了。

2 装备作战完整性的基本内涵

2.1 装备作战完整性的本质属性

装备的作战完整性、作战适用性与作战效能是任何装备的3个基本属性。装备的作战完整性反映的是装备在作战使用过程中的综合质量特性,也就是装备是否能用的问题。GJB 451A—2005《可靠性维修性保障性术语》中,将作战适用性定义为:“装备系统投入战场使用的满意程度。它与可靠性、维修性、保障性、安全性、兼容性、互用性、运输性、环境适应性、文件、人员和训练等因素有关。”其核心是反映装备令人满意地投入外场使用的程度,也就是装备是否好用的问题。装备作战效能是装备被具有代表性的人员在计划的或者预期的装备使用环境(如自然环境、电磁环境、战场威胁等)中完成任务的总体程度,考虑的因素有编制、原则、战术、威胁(包括干扰、初始核武器效应和核生化威胁)等。其核心是反映装备完成任务的程度,也就是装备是否管用的问题。

例如某型坦克,其装甲防护很好,在作战使用过程中,无论敌方如何攻击,其总是完好无损而且坦克性能稳定,这就表明其作战完整性好;但是由于其重量等原因导致在泥泞道路上无法有效机动,这就是其作战适用性不好;而如果该坦克顺利到达预定战位,其火炮攻击发发命中,而且命中即摧毁敌方目标,这就是其作战效能好;而如果该坦克顺利到达预定战位,其火炮攻击不能命中,或者命中也不能毁伤敌方目标,这就是其作战效能不好的表现。装备的3个基本属性的关系见图1。

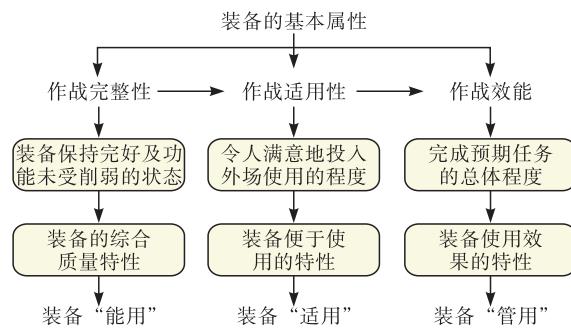


图1 装备3个基本属性关系

从装备作战完整性、适用性与作战效能任务级方面的各个要素——装备完好、部署、使用和维持之间关系来理解,装备的作战完整性、作战适用性与作战效能的任务关系见图2。

从上文所述可以看出,装备的作战完整性是装备作战适用性与作战效能发挥的基础,是装备的综合质量特性,反映的是装备在作战使用过程中是否

“能用”的基本问题,是通过设计赋予、通过制造固化到装备上的基本属性,其需要通过“装备研制试验与评价”“装备实弹打击试验与评价”“装备作战使用试验与评价”来共同进行试验验证与评价。

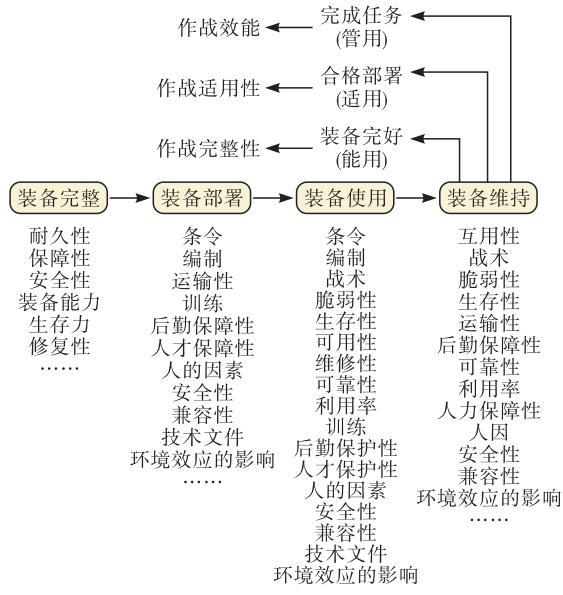


图 2 装备作战完整性、适用性与效能的任务关系

2.2 装备作战完整性的研究范畴

装备作战完整性是表征装备在整个作战使用过程中保持完好以及功能不削弱的状态属性。因此,分析研究装备的作战完整性,首先就要分析装备的主要作战使用流程。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。而后装备再集结,如此进入下一个作战使用循环,直至战斗胜利,见图 3。

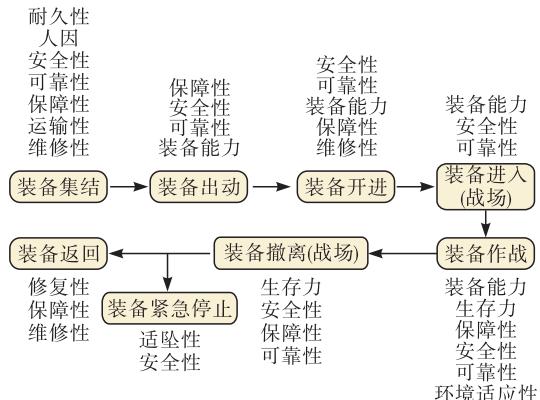


图 3 装备作战使用各阶段对装备特性的要求

要在整个作战使用循环中保持装备的完好以及功能不削弱的状态,各个阶段要对装备的基本特性提出各种要求。有些最关键、核心的要求,如果达不到,将直接影响装备的完好程度或者影响其功能的发挥。比如,装备集结阶段,首先就要拥有足够的可以使用的装备,这就对装备的耐久性提出了直接的要求。如果装备的耐久性差,用不了多久就没有装

备可用,也就谈不上集结了。装备出动阶段,首先就是要保证装备的保障性。只有保障性好了,才能让集结待命的装备可以快速有序地出动。不然,集结待命的装备虽多,但能有效开动出动的不多,最后也就不能有效投入作战了。在装备向前线机动开赴的阶段,对装备的首要要求就是其保障性和安全性。对于飞行器这样的装备,在飞行中不能停下来维修保障,有些故障将直接导致坠机等事故发生,安全性则成为最重要的要求。如果安全性达不到要求,就意味着装备在向前线机动开赴的过程中自己就先出事了,当然也就终止了作战任务。当装备成功进入战区准备作战时,主要的要求就是功能能力。如果其功能能力达到要求状态,装备就可以开始有效攻击,进入到作战状态;如果装备功能能力达不到要求,就意味着装备不能开始有效攻击,不能进入到预定的作战状态。在装备作战阶段,装备的作战性能与生存力最为重要。作战性能不能发挥就不能有效攻击,而生存力不好就意味着自己将被敌方击毁。装备撤离战场阶段,装备的可靠性、安全性、保障性和生存力就显得非常重要。其中,如果生存力不好,将直接导致受损的装备无法撤离。待装备返回后,如果装备没有受损,将可以直接再进入集结状态,进入执行下一次作战任务。若装备受伤无法返回,则需要紧急停止(对军用飞机来说需要紧急迫降),有适坠性的要求,属于安全性的一部分内容,也是装备能力的要求。如果装备受损,则要对其进行修复,这时装备的修复性就至关重要。修复性好,则受损装备可以被快速修复,重新投入使用;如果修复性不好,则受损装备将不能被快速修复,从而影响下一次任务的执行,甚至可能几个波次的任务下来将没有装备可用,最后直接影响战斗的胜利。

装备的可靠性在耐久性中反映,维修性、测试性等在保障性中反映。装备在作战使用过程中要保持完好或者功能不削弱,从上面的分析可以看出就是要保持装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性在一个满意的水平。因此,研究装备的作战完整性就是要研究装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性,并且要把他们作为一个有机的相互联系的整体进行研究。

2.3 装备作战完整性的基本特性

装备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。

客观性是指装备作战完整性是客观存在的一种装备的属性,可以使用某种手段去度量。相对性是指装备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

机性是指由于装备本身质量、承担任务和工作环境的随机导致装备作战完整性也具有随机特性,所以可使用概率统计的方法来描述装备作战完整性。可控性是指装备作战完整性可以通过一定的措施实行控制,使装备作战完整性得到保持和增长。

2.4 装备作战完整性中各参数间的联系

装备作战完整性是在作战实施和准备阶段的整个作战使用过程中保证装备规模、正常出动、安全使用、完成作战任务和在战场上存活的基础,直接影响部队战斗力。根据装备作战完整性的定义,装备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,对作战任务完成的影响如图4所示。



图4 装备作战完整性差的体现

实际情况比图4描述复杂得多,有些指标在几个阶段都要起作用。

可以看出,在装备作战完整性中,任何一方面的指标短缺,都会导致装备作战完整性的整体水平不高,即装备作战完整性指标体系符合“木桶原理”,在装备全寿命周期中必须全面、协调考虑。

3 装备作战完整性的表征方法

3.1 装备作战完整性的度量

为了有效地表征装备作战完整性,可以给出装备作战完整性指标——装备作战完整度 I_o ,并以此对装备作战完整性进行度量。装备作战完整度即为在规定的时间内、规定的条件下,装备执行规定任务时,装备可以保持完好(或者正常使用)及功能未受到削弱的概率,可用式(1)表示。根据装备作战完整性的定义,装备可以正常使用及功能未受到削弱时的状态是由装备的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存力和修复性等因素决定的。因此,装备作战完整度 I_o 也可以用装备完好度 U 、可用度 A 、安全度 S 、存活率 C 、生存率 S_u 和修复度 R_c 来综合表征。

$$I_o = P\{\tau > t_0\} = f(U, A, S, C, S_u, R_c) \quad (1)$$

式中: τ 表示装备可以正常使用及功能未受到削弱的时间; t_0 表示规定的时间; U 是装备完好度, $D=$

$1-U$ 为损伤度,是装备在达到指定时间 t 时所产生的耐久性损伤的定量度量; A 为可用度,是指在一定的保障水平(人员和备件)下,能正常出动的装备数量占装备总数的比例; S 是装备安全度,表示装备在整个寿命周期内在规定的条件下完成规定任务时不发生事故的概率; C 是装备存活率,而 $F=1-C$ 为装备失效破坏率,是装备承受负荷的能力小于装备所承受的负荷时装备发生失效破坏的概率; S_u 为生存率,是指在各种武器损伤和非计算负荷作用下,装备能够保持工作状态的概率; R_c 是修复度(或称为恢复度),表示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,使受到意外损伤或者非常规损伤的装备恢复到完成规定任务能力状态的概率。这些装备的特性参数又是由装备的各个系统的特性参数决定的。

为简化目的,装备的完好度、可用度、安全度、存活率、生存率和修复度可以看作相互独立。如果将各影响参数对装备作战完整性的影响简单地以线性关系表示时,装备的作战完整度模型可以表达为:

$$I_o = UASCS_uR_c \quad (2)$$

式(2)反映出的装备作战完整性存在“短板效应”,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影响。若完好度偏低,则装备的耐久性差,装备的使用寿命短、不耐用,会导致出现无装备可用的情况;若装备的可用度低,则装备出勤率太低,会导致出现有装备而无法出动使用的情况;若安全度偏低,则装备安全性差,出动执行任务后无法保证安全使用,会导致出现有装备出动而无法安全使用的情况;若装备存活率偏低,则装备承受负荷的能力差,执行作战任务的能力差,会导致出现装备即使能够安全抵达但也无法执行既定作战任务的情况;若装备的生存力低,将导致装备在执行作战任务时容易为敌方所伤,严重时导致装备损毁;若装备的修复性差,将导致受损装备无法及时修复补充到作战装备序列中,严重时可能几个波次的战斗过后将导致装备损耗殆尽,直接影响作战任务完成。

因此,只要完好度、可用度、安全度、存活率、生存率和修复度等有一项指标差,便会导致装备的作战完整性差。同时,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。

当然,在实际工作中,装备的作战完整性也可以用装备的完好率来直观反映,其表示的是在一定的作训环境条件下,在规定的作训期间内,状态完好的

装备数量占装备总数量的比率。

$$R = E_{\text{intact}} / E_{\text{total}} \quad (3)$$

式中: R 表示装备的完好率(Readiness Rate); E_{intact} 表示完好装备的数量; E_{total} 表示装备的总数量。实际上,装备完好率又可以分为平时装备完好率 R_t 与战时装备完好率 R_b , 它们的数值一般是不一样的。

可以看出,装备完好率表征了装备作战完整性的直观结果,但是不能反映其与装备其他通用质量特性参数的直接关系。装备作战完整度 I_o 同样可以用来表征装备作战完整性,而且,其还可以反映与装备完好度 U 、可用度 A 、安全度 S 、存活率 C 、生存率 S_u 和修复度 R_c 等参数之间的关系,可由此实现对装备作战完整性的设计与控制。

3.2 装备完好度的表征

在实际应用中,在装备规定的服役使用条件和耐久性寿命周期内,其可靠性水平的高低也就反映了其耐久性的好坏程度。只不过,通常研究可靠性时是在装备不进行修理的情况下对装备的失效情况进行统计分析;而研究耐久性时,是允许对装备进行耐久性修理(即不引起装备性能改变的经济修理)的情况下对其能否达到某一预期的服役使用周期的情况进行统计分析。因此,可以看出,装备的耐久性不仅反映了装备的可靠性,还反映了装备的经济性。

可以用装备的损伤度 D 来度量装备的耐久性寿命期内损伤的严重程度,是装备在达到指定耐久性时间 t 时所产生的损伤的定量度量:

$$D = \bar{L}(t) / N \quad (4)$$

式中: $\bar{L}(t)$ 为达到指定耐久性时间 t 时不能保持完好(或正常工作)及功能未受削弱的装备数量; N 为某型装备的总数量。

因此,可以用装备的完好度 U 来度量装备的耐久性:

$$U = 1 - \bar{L}(t) / N \quad (5)$$

3.3 装备可用度的表征

装备的可用度又常常分为固有可用度、使用可用度和可达可用度。其均可用于度量装备的保障性。这里仅以固有可用度来代表装备的可用度进行简要分析^[14-15]。

固有可用度 A_i 是装备实际工作时间与总时间的比值。假设故障概率密度函数为 $b(t)$, 维修时间密度函数为 $m(t)$, 则故障间隔时间 T_u 和维修时间 T_m 分别为:

$$T_u = \int_0^\infty tb(t) dt \quad (6)$$

$$T_m = \int_0^\infty tm(t) dt \quad (7)$$

则固有可用度为:

$$A_i = T_u / (T_u + T_m) \quad (8)$$

装备的可用度为:

$$A = A_i \quad (9)$$

3.4 装备安全度的表征

装备安全度用于度量装备的安全性。装备安全性不同于装备可靠性,但它们具有紧密的联系。一方面,装备可靠时通常被认为是安全的;另一方面,当装备失效时,事故可能发生,也可能不发生,取决于该失效能否被及时发现和处理。所以,装备在整个寿命周期内在规定条件下完成规定任务时发生事故的概率 P 可以表示为^[16]:

$$P = (1-R) \cdot P_{A/F} \quad (10)$$

式中: R 为装备可靠度; $P_{A/F}$ 为装备失效时发生事故的概率。

所以,装备安全度 S 可以表示为:

$$S = 1 - P = 1 - (1-R) \cdot P_{A/F} \quad (11)$$

若定义 $P_{A/F}^- = 1 - P_{A/F}$ 为装备失效时不发生事故的概率,则上式可以转化为:

$$S = R + (1-R) \cdot P_{A/F}^- \quad (12)$$

3.5 装备存活率的表征

装备的失效破坏率可用于度量装备的能力特性。任何一型装备都有其设计需要达到的能力,即需要能够承担设计的额定负荷。在实际服役使用过程中,对于生产交付使用的装备,其承担负荷的能力是一个随机变量,而装备实际承担的负荷也是一个随机变量。这就必然会发生即使在正常服役使用过程中也有装备由于承担负荷的能力小于其实际承担的负荷而导致失效破坏。因此,可以采用装备承载能力-负荷干涉模型进行描述,其关系见图 5。

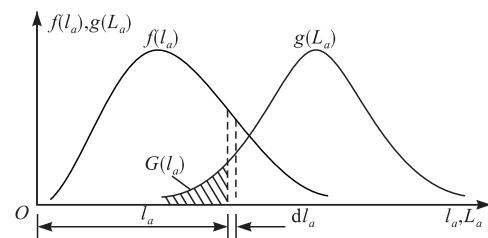


图 5 装备承载能力-负荷干涉模型

若已知装备负载幅值 l_a 与能力幅值 L_a 的一维概率密度函数分别为 $f(l_a)$ 和 $g(L_a)$, 则对应任一负载幅值 l_a , L_a 小于 l_a 的概率为:

$$G(l_a) = P(L_a < l_a) = \int_0^{l_a} g(L_a) dL_a \quad (13)$$

因为负载幅值恒为非负值,故积分下限取 0。分布函数 $G(l_a)$ 如图 5 中的阴影面积所示。作为随

机变量的负载幅值 l_a 发生的概率是 $f(l_a)dl_a$ 。由于 $G(l_a)$ 是 l_a 的单调函数,亦为一随机变量, $G(l_a)$ 发生的概率也是 $f(l_a)dl_a$ 。两者的乘积即装备失效概率 F 的微分 dF :

$$dF = G(l_a)f(l_a)dl_a \quad (14)$$

对上式积分,则得装备的失效概率 F :

$$F = \int_0^{(l_a)_{\max}} G(l_a)f(l_a)dl_a \quad (15)$$

将式(13)带入上式,可得:

$$F = \int_0^{(l_a)_{\max}} \left[\int_0^{l_a} g(L_a)dL_a \right] f(l_a)dl_a \quad (16)$$

因此,装备的存活率为:

$$C = 1 - F \quad (17)$$

3.6 装备生存率的表征

装备生存力(或生存性)是指装备在执行作战任务时,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,可用装备生存率来表征^[17]。也就是说,装备在作战时,在敌方武器威胁的环境下,应具有尽量不被敌人发现即低的探测敏感性,遭到敌方武器攻击后减少致命损伤即低的易损性的能力。因此,装备的敏感性和易损性是决定装备生存力的2个主要因素。

装备的敏感性是与装备作战生存力相关的首要因素,是指装备在完成作战任务过程中被威胁击中的可能性。敏感性一般用被威胁机理中的概率 P_H 来表示。敏感性通常包括威胁活动、装备的探测、识别与跟踪以及威胁发射、传播物的飞行、弹头撞击爆炸等,通常由装备被威胁探测的概率 P_D ,被识别、跟踪及瞄准的概率 P_C 、威胁传播物发射或开火的发射概率 P_L ,威胁击中装备的概率 P_{Hit} 等表示如下:

$$P_H = P_D P_C P_L P_{Hit} \quad (18)$$

在工程应用中,也常用在战斗中被击中装备的数量与暴露于敌方威胁中装备数量的比值来表征装备的敏感性:

$$P_H = M_{Hit}/M \quad (19)$$

式中: M_{Hit} 是被击中装备的数量; M 是暴露于敌方威胁中装备数量。

装备的易损性是指装备不能承受损伤机理一次或者多次打击的程度,是指装备在被敌方火力击中时倾向于严重损伤与毁坏的程度。装备的易损性越高,则受到打击时装备越容易被杀伤。易损性是一种条件概率,用装备被一种或者多种损伤机理中后的损伤的概率 $P_{K/H}$ 表示,也是损失的装备数量与被击中的装备数量的比值:

$$P_{K/H} = M_{Lost}/M_{Hit} \quad (20)$$

式中: M_{Lost} 是损失的装备数量; M_{Hit} 是被击中的装备数量。

因此,装备参加一次战斗后,其损伤率为:

$$P_D = P_H P_{K/H} \quad (21)$$

则,装备的生存率为:

$$S_u = 1 - P_D \quad (22)$$

3.7 装备修复度的表征

装备修复性(或恢复性)是指装备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(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功能状态的能力。

装备修复性可以用修复度来描述,是一项概率指标,同时主要反映在修复时间上,记为 $R_c(t)$ 。 $R_c(t)$ 的含义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,使受到非常规损伤的装备恢复到完成规定任务能力状态的概率,或者用恢复到完成规定任务能力状态的装备数量所占的比例来表示,即可用下式表示:

$$R_c(t) = P(T \leq t) = (q_t - q_{n,t})/q_t \quad (23)$$

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 内装备中受到非常规损伤的总数量和不能恢复到完成规定任务能力状态的数量。

装备修复性 $R_c(t)$ 也可以用平均修复时间 MT-TRC 来表示,MTTRC 即为具有一定意外损伤级别的装备,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,修复到规定功能状态所用的平均时间,即:

$$M_c = E(Y) = \int_0^{\infty} tm(t)dt \quad (24)$$

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,装备修复性也可使用平均意外损伤修复费用 MRCC 来表征,MRCC 即为具有一定意外损伤级别的同一型号的装备,由具有规定技术水平的人员,利用规定的程序进行修复时,修复到规定功能状态所使用的平均资源量,通常可用费用来衡量。该指标可用于类似装备修复性之间的比较。

显然,修复性是装备的一种固有特性,主要通过装备的设计过程来提高。具有高修复性的装备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、快速地恢复装备的能力。特别是在战场环境下,高修复性对提高装备的再次出动能力以及维持作战装备规模具有重要意义。

装备的修复性和维修性都是通过设计过程赋予的装备固有特性,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(如飞行器鸟撞、雷击、地面装备碰撞等)和战伤(如武器击伤和二次损伤等),重点在于“修理恢复”,强调的是针对不可预见损伤的修复措施。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。

4 装备作战完整性的几点说明

目前已经有战备完好性、可用性、出动架次率(对于飞机)等综合参数用于度量装备的可用状态。而装备的作战完整性作为综合质量特性,除了可以用装备作战完整度来描述以外,还可以用装备的完好率来描述。描述装备在规定的时间内,规定的服役使用条件下(包括储存条件、作战使用条件和维修保障条件等),执行规定任务(或完成规定功能)时装备的可用程度,反映的是装备的固有状态属性,即综合质量特性。这些参数之间是有着本质区别的。

1)战备完好性分为平时和战时2种情况,平时反映为装备在规定的储存和战备等级条件下,当需要时有多少装备能动用,并在规定时间内投入作战使用,可以构造为装备可用性和战斗准备时间的函数;战时反映在规定的环境(使用和保障)条件下,装备完成一次作战任务后能继续完成下一次任务的能力,一般用战备完好率表示。其反应的是装备的即时状态,并未考虑装备在受损后被修复的情况,而且是战斗准备时间的函数,还反映了装备的维修保障水平,部队可以通过提高维修保障水平来提高装备的战备完好率,因此战备完好率常常用来检验部队的维修保障能力。在平时的情况下,如果是在规定的储存条件、使用条件和维修保障条件下,战备完好率与本文中所说的装备完好率是相等的,这时反映的就是装备在服役使用过程中保持完好或功能不退化的固有特性,即作战完整性。

2)装备的可用性是指,装备在任一时刻需要和开始执行任务时,处于可工作或可使用状态的程度。可用性是表征可靠性、维修性、测试性和保障性的综合,反映测试装备运行质量及综合保障情况。不考虑执行任务过程中装备的生存力和战伤装备修复性等特性,也就是不能反映装备在整个作战链条中的综合质量特性。

3)军用飞机出动架次率指在规定的使用及维修保障方案下,每架飞机每天能够出动的次数,也称为单机出动率或战斗出动强度。出动架次率(SGR)是衡量军用飞机(尤其是战斗机)在作战环境下连续出动能力的重要指标,是反映军用飞机战时战备完好性最重要的指标之一,也是反映航空部队战斗力的重要参数。能出动的飞机并不一定是完好的飞机,在飞机功能削弱的情况下也是可以出动的。所以出动架次率不能反映装备的综合质量特性。

5 结语

1)提出了装备作战完整性的基本概念,阐明了其表征的是装备在作战使用过程中的综合质量特性,反映了装备在作战使用过程中是否“能用”的根本问题。

2)阐述了装备作战完整性的基本内涵,提出了装备作战完整的表征方法, $I_o = f(U, A, S, C, S_u, R_c)$,为简化,也可以表征为 $I_o = UASCS_uR_c$ 。

3)对装备的耐久性、生存力与修复性的概念、度量方法等进行了较为仔细的阐述,并提出了装备承载能力-负荷干涉模型进行描述装备由于能力不足而引起的失效概率问题。

4)对战备完好性、可用性、出动架次率和作战完整性进行了比较说明。

本文试图对装备的综合质量特性进行科学地描述与表征,为装备的综合质量控制提供理论依据。但研究工作还是初步的,还有很多工作需要继续深入研究。需要指出的是,装备的作战完整性的基本概念与表征同样可以适用于其他产品,只不过对于普通产品,可以称为使用完整性更为合适。

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] 王立群.航空装备的完整性[J].航空学报,1988,9(10):433-439.
- [3] USA Department of Defense. Engine Structural Integrity Program (ENSIP) [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1783(USFA),1984.
- [4] USA Department of Defense. Avionic Integrity Program (AVIP) [R]. Department of Defense Standard MIL-STD-1796A(USFA),2011.
- [5] USA Department of Defense. Mechanical Equipment and Subsystems Integrity Program [R]. Department of Defense Standard MIL-STD-1798C(USFA),2013.

(下转第 31 页)

期的电压采样量作为参考量,与当前时刻的采样值比较得到电压残差,利用故障后的电压残差信号突变进行故障诊断。仿真分析结果表明,对于电压闭环控制的三相逆变器系统,该方法有较好的抗三相不平衡负载及负载突变的能力,且诊断时间较快,小于一个周期,诊断所需的电压检测量可以从电压闭环控制系统中得到,不需要额外的传感器,故障诊断程序可以集成到闭环控制系统中。该方法具有成本低、容易实现、诊断时间短、抗干扰性强等优点。

参考文献

- [1] CHOI U M, LEE J S, BLAABJERG F, et al. Open-Circuit Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for a Grid-Connected NPC Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(10): 1-1.
- [2] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, et al. An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [3] 胡亮灯,孙驰,陈玉林,等.大功率IGBT的短路故障检测[J].电工技术学报,2018,33(11):194-205.
- [4] LI X C, XU D W, ZHU H Y, et al. An Indirect IGBT Over-Current Detection Technique via Gate Voltage Monitoring and Analyzing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(10): 1-1.
- [5] RODRIGUEZ-BLANCO M A, CLAUDIOI-SANCHEZ A, THEILLIOL D, et al. A Failure-Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1625-1633.
- [6] 王禹玺.多能源储能系统中三相逆变器故障诊断方法与参数辨识的研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [7] 陈丹江,叶银忠.基于多神经网络的三电平逆变器器件开路故障诊断方法[J].电工技术学报,2013,28(6): 120-126.
- [8] DELPHIA C, CHEN H, DIALLO D. SVM Based Diagnosis of Inverter Fed Induction Machine Drive: A New Challenge [C]// 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Canada: IEEE, 2012A: 3931-3936.
- [9] 徐继伟,宋保业,公茂法.基于深度神经网络的多电平逆变器故障诊断[J].电测与仪表,2018, 56(2): 123-128.
- [10] YAN H, XU Y, CAI F, et al. PWM-VSI Fault Diagnosis for PMSM Drive Based on Fuzzy Logic Approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1): 759-768.

(编辑:姚树峰)

(上接第8页)

- [6] USA Department of Defense. Weapon System Integrity Program [Z]. US: Department of Defense Standard MIL-HDBK-515 (USFA), 2013.
- [7] USA Department of Defense. Propulsion System Integrity Program [Z]. US: Department of Defense Standard MIL-STD-3024(USFA), 2008.
- [8] YE YT, ZHANG T, MA B L, et al. Structural Integrity Control Technology Based on Structural Damage Monitoring[C]//36th Conference and 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity. Poland: [s. n.], 2019.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 张建华.飞机战伤抢修工程学[M].北京:航空工业出版社, 2001.
- [13] 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.
- [14] 张恒喜,刘晓东,段宝君等.现代飞机的效费分析[M].北京:航空工业出版社, 2001.
- [15] 马绍民,章国栋.综合保障工程[M].北京:国防工业出版社, 1995.
- [16] 何宇廷.飞行器安全性工程[M].北京:国防工业出版社, 2014.
- [17] 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.

(编辑:姚树峰)