

# 飞行器的修复性及其设计方法

何宇廷

(空军工程大学航空工程学院,西安,710038)

**摘要** 飞行器在正常服役使用期间发生故障后是否便于维修使其状态得到及时恢复的特性常常可用维修性来进行表征分析。然而,飞行器在服役使用过程中总是不可避免地要发生一些意外损伤或者非常规损伤,比如事故损伤、战斗损伤等。这时,飞行器是否便于修复使其状态得到及时恢复的特性可用修复性(或恢复性)来进行描述。在阐述飞行器修复性的基本概念、定性要求的基础上,提出采用意外损伤平均恢复时间 MT-TRC、平均恢复费用 MRCC 及平均恢复工时 MWTTRC 等参数来表征飞行器的修复性。结合飞行器使用完整性/军用飞行器作战完整性的概念、度量与控制方法给出了飞行器修复性的作用意义,并提出了飞行器修复性的基本评估和设计方法。最后,给出了一个简单的后掠单块式机翼结构修复性设计的简要示例,并说明修复性的概念、度量与设计方法等对于其他装备也是适用的。

**关键词** 飞行器;修复性;设计;飞行器使用完整性;控制

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.001

**中图分类号** V215.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0001-08

## Aircraft Recoverability and its Design Methods

HE Yuting

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

**Abstract:** Usually the maintenance is characterized by maintenance personnel to repair easily or not when the aircraft have some failures during the normal service period. But, it's hardly for aircraft to avoid the accidental and unexpected damage in the service, such as accident damage, battle damage etc. And then the recoverability is used to represent easy to repair, uneasy to repair, and recoverable when the aircraft are subject to some accidental and unexpected damage. On the basis of concepts and qualitative requirements of aircraft recoverability, this paper proposes parameters MTTRC (Mean Time to Recovery), MRCC (Mean Recovery Cost) and MWTTRC (Mean Work Time to Recovery) to characterize aircraft recoverability. Then, the significance of aircraft recoverability is discussed as well as the concept, measurement and control of aircraft operational integrity. Furthermore, the normal assessment and design methods of aircraft recoverability are put forward. Finally, a brief example of recoverability design for a monolithic backswept wing structure constructed by ribs, stringers and skins. The concept, the measurement and the design of recoverability are suitable for other equipment and devices.

**Key words:** aircraft; recoverability; design; aircraft operational integrity; control

**收稿日期:** 2019-07-11

**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研究。E-mail:heyut666@126.com

**引用格式:** 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.

在飞行器的设计中,可靠性、安全性、维修性、保障性、测试性等已经成为重要的设计参量<sup>[1-3]</sup>。这些特性实际上都是反映飞行器在正常服役使用时的特殊特性。现代飞行器又提出了坠撞性<sup>[4]</sup>以反映飞行器抗坠撞的能力。对于军用飞行器又提出了生存力<sup>[5]</sup>的指标以反映在作战条件下飞行器不被敌方发现以及抗敌方武器攻击的能力。然而,不论是军用飞行器还是民用飞行器,在服役使用过程中,除了产生由于使用周期累积而导致的正常的常规损伤外,总是不可避免地要发生意外的损伤或者非常规的损伤,如事故损伤、战斗损伤、鸟撞损伤、冰雹损伤、工具跌落损伤、外来物冲击损伤等等。这些意外损伤常常是偶然发生的,其发生的部位与规模也不是可以准确预测的。当这些意外损伤发生后,一般情况下都要对飞行器进行修理以恢复其初始完好状态或者恢复到某一个可执行任务的状态。对飞行器意外损伤的修复显然与飞行器在正常服役使用期间的正常维修活动是完全不同的,不论是修复工具、修复方式、修复时限以及修复要求等。飞行器在发生意外损伤后是否便于修理恢复到完好状态(或者某一个规定状态)的特性是飞行器的固有特性,是由飞行器的设计工作决定的。这一特性可以由飞行器的修复性或者恢复性(Recoverability)来表征<sup>[6-7]</sup>。

## 1 飞行器修复性的基本概念

飞行器的修复性是指飞行器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进行修复时,恢复到规定任务能力状态的能力。飞行器的修复性又可以称为恢复性(Recoverability),其是飞行器的固有属性,是通过飞行器的设计、制造过程固化到飞行器的。这里所说的飞行器通常主要是指飞机,当然也包括航天器,因为航天器在太空中也会受到太空碎片、太空陨石等的高速撞击损伤等意外损伤,未来宇航员对受损航天器进行太空修复也将是必然。飞行器的修复性通常又是由飞行器各系统(包括发动机)的修复性决定的。

飞行器各系统(包括发动机)的修复性可以类似地定义。比如,飞行器结构的修复性(或称为恢复性)是指飞行器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意外损伤或者非常规损伤(如事故损伤、战伤等)进行修复时,恢复到规定任务能力状态的能力。

需要指出的是,飞行器的修复性和维修性都是通过设计制造过程赋予的飞行器的固有属性,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”,一般有预期的故障(或损伤)部位、故障模式、故障规模与标准维修或排故方案,装备的维修性参数及要求通常也是针对装备正常使用情况下的;而修复性针对的是意外损伤或非常规损伤,包括事故损伤(如碰撞、坠撞、迫降、冲出跑道引起的损伤等)、鸟撞损伤、雷击损伤等和战斗损伤(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意外或非常规损伤的修复措施,这些意外损伤的发生部位及损伤规模等往往是不可有效预期的。正常服役使用时维修性很好的飞行器,当发生意外损伤或非常规损伤时,可能由于不同的损伤部位与原有的结构形式使得其难于修复或者不可修复,也就是其修复性不好。有些飞行器设计方法,可同时使得维修性和修复性都得到提高,比如开敞性或者可达性设计,就可以既使得平时方便维修,也使得发生意外损伤时便于修复。有些飞行器设计方法,可以使得维修性得到改善,但却使得修复性降低。比如,结构设计中的整体结构的应用就可以显著提高结构的维修性,因为与组合结构相比需要检查的关键危险部位显著减少了,危险部位是否有裂纹、腐蚀等损伤也便于检查发现,即使发现细小的裂纹、腐蚀等损伤也便于采用打磨等方法快速修理去除;但是,整体结构在发生较严重意外损伤时却不如组合结构便于修复,其修复性反而降低了。再比如,在飞行器的各种管路设计中,为了提高维修性,可以采取整体管路设计,也就是尽量减少管路接头,因为接头越多就越有可能发生渗漏故障;但是,整体管路一旦发生意外损伤(如中间段某部位战斗损伤等),将导致管路的修复工作非常困难,在条件达不到要求时甚至不可修复,管路系统的修复性降低了。文献[8]针对战伤抢修与平时的维修工作进行了认真的分析区别,认为他们基本上是一回事,甚至“毫无共同之处”。这些都说明飞行器正常服役使用时发生故障后是否容易修复与发生意外或非常规损伤时是否容易修复不是一回事,不能用同一个指标参数来度量表征,也就是说飞行器的维修性与修复性不是一回事,它们是飞行器的两个不同的固有属性。

还需要说明的是,飞行器的修复性好坏与飞行器发生意外或非常规损伤时是否可以修复不是一回事。修复性表征了飞行器发生同等级别的意外或非常规损伤时修复的难易程度。比如,都是机翼翼尖发生碰撞导致同等程度的变形损伤,容易修复的则

修复性好,不容易修复的则修复性不好。而飞行器发生意外或非正规损伤时是否可以修复虽然与修复性有关,但主要取决于飞行器的受损程度,受损程度太严重将直接导致其不可修复,这主要与经济性有关。

## 2 飞行器修复性定性要求

飞行器的修复性应该在飞行器设计之前就必须明确和确定的。对于不便于采用量化指标进行描述的修复性要求,一般可以用定性要求来进行描述,修复性的定性要求又可以通过转化为设计准则来实现。飞行器修复性的定性要求是对飞行器的意外损伤或非正规损伤的修复简便、迅速、经济的具体化。修复性定性要求的作用:它是实现修复性定量指标的具体技术途径或方法,即按照这些要求去设计飞行器以实现修复性的定量指标;同时,它也是修复性定量指标的补充,即有些不便于用定量指标反映出来的要求,只好定性描述。

飞行器修复性的定性要求有些与维修性的要求相同,有些则不同。主要有:

1)良好的可更换性。良好的可更换性将显著提高飞行器各系统的修复性。如采用模块化设计,飞行器在发生意外损伤或非正规损伤时,只需要更换受损模块即可恢复其规定的功能状态,这种模块的更换往往是更快速、方便的。

2)良好的互换性。为了提高飞行器的修复性,飞行器各系统部件的互换性非常重要。互换性是指同种部件之间在实体上及功能上能够彼此之间互相替换使用的性能。互换性使得系统部件能够互相替换,便于对遭受意外损伤或非正规损伤的部件进行及时替换修理,既减少了修复周期,又减少了零部件的类型,简化和节约了备件供应及采购费用。

3)良好的通用性。飞行器零部件或者产品良好的通用性将使得飞行器在发生意外损伤或非正规损伤时更便于修复,特别是便于作战飞行器在战场环境下的战伤抢修中采用换件或拆拼的快速修理方法。其有益效果包括:显著减少飞行器修复时备件的品种和数量、简化保障环节、节省维修费用、降低对修理人员技术水平的要求等。

4)良好的可达性。可达性是修复遭受意外损伤或非正规损伤的飞行器时接近须要修复部件不同组成单元的相对难易程度,也就是接近修复部位的难易程度。修复部位可达性好,修复时不需要拆装其他零部件或者拆装简便,容易达到修复部位,同时还具有为检查、修理、更换所需要的操作空间。那些需

要修复时却看不见或者看不清、够不着、工具使用不开,要费很大周折才能进行的部件、结构就是可达性差的部件、结构。可达性不好往往要耗费很多修理人力、时间和费用。

5)良好的测试性。飞行器的测试性是指飞行器各系统便于确定其状态并检测、诊断故障的一种设计特性。对于修复完成的各个系统能够准确、快速、简便地检测诊断其状态,对于快速确认修理质量、提高修复性具有重要作用。

6)修复的安全性。针对修复性所说的安全性,是指避免修理活动时人员伤亡或者设备损坏的一种设计特性。由于意外损伤的飞行器往往可能面临与平时使用维修工作所不同的场地、环境、损伤模式以及其它修理条件,这些都可能使得修理工作中发生不安全的问题,从而导致修复工作的失败。如果在飞行器的设计中就考虑了这些问题,并进行了针对性地改进设计,就可以有效提高飞行器的修复性。

需要说明的是,通常所说的维修安全性<sup>[1]</sup>是指在正常的维修活动中避免人员伤亡和设备损坏的设计特性。而修复安全性是指在发生意外损伤或非正规损伤时修复飞行器的活动中避免人员伤亡和设备损坏的设计特性。它们之间有相关联的地方,但本质上是不同的。

7)工艺的简便化。飞行器发生意外损伤或非正规损伤时,由于损伤的部位与程度不便于提前精确预测,而且在发生意外损伤后,其修复工作可能在陌生简陋的场地进行。如果修复要求的工艺方法特别复杂,就可能导致受损飞行器无法得到及时修复。从提高飞行器修复性的角度来说,应当在设计时就要考虑其发生意外损伤的可能,而且将意外损伤的修复便捷化,也就是要将修复工艺设计得尽可能简单,便于操作,包括修复工具设备设计得尽可能简单,便于保障等。

8)降低修复技能。由于意外损伤发生的特殊性,其修复工作往往不是在正常环境条件下进行的,有时还是应急修理或者抢修,比如战斗损伤等。修理的人员队伍往往不是正规编制序列的,也可能是应急组建的。这样的修理队伍在陌生简陋的环境下修理技术水平必然要受到影响。在进行飞行器修复性设计时就要考虑到降低修理的技能水平要求,如减少复杂的操作步骤和修理工艺要求,尽量采用换件修理或者简易的修理方法以使修理工作简便,缩短修复时间,也缩短修理人员的培训周期。

9)符合人素工程。意外损伤飞行器的修复过程中的人素工程是研究在修理过程中人的各种能力(如体力、耐受力、感官力、心理容量等)、人体尺寸等

因素与各种设备的关系,以及如何提高修理工作效率、质量与减轻人员疲劳等方面的问题。在飞行器的修复过程中,人员有良好的工作姿势,较好的工作条件(如噪音小、照明好、工具合适等)以及适度的劳动强度,就能很好地提高修理人员的效率和工作质量,从而使受损飞行器得到及时修复。

恰当地提出飞行器的修复性要求,是进行飞行器修复性设计的关键环节。飞行器修复性的一般要求可以在明确飞行器修复性方面的使用需求的基础上综合分析提出。重要的是要详细研究分析相似或者相近型号飞行器修复性的优缺点,特别是研究分析那些修复性不好或者不满足要求的飞行器,根据特殊需要和技术发展情况,有重点、有针对性地提出若干必须要达到的修复性定性要求。比如,针对同类型飞机结构存在的修复性缺陷,着重提出结构的某些关键部件的互换性要求以及提高关键部件的标准化程度,部分结构件应该与现有型号飞机通用等,便于必要时拆配快速修复意外损伤的飞机结构等。

### 3 飞行器修复性的度量表征

飞行器的修复性(或恢复性)可以使用修复度来表征描述,是一项概率指标,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理,使受到意外损伤或者非常规损伤(如事故损伤、战伤等)的飞行器恢复到规定任务能力状态的概率,也可以用受到意外或非常规损伤的飞行器恢复到规定任务能力状态的飞机数量所占的比例来表征。可用下式表示:

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

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 $q_{n,t}$ 分别指规定时间内机队中受到意外或非常规损伤飞机的总数量和不能恢复到规定任务能力状态的飞机数量。

飞行器的修复性(或恢复性)参数可以用修复时间参数、修复费用参数和修复工时参数等来表示。这些指标参数通常可用于飞行器修复性的量化表示,也可用于类似飞行器修复性之间的比较或者同型飞行器不同设计方案的修复性比较分析。

飞行器的恢复时间参数可用平均恢复时间MTTRC(Mean Time to Recovery)来表示,记为 $T_{mr}$ 。MTTRC即为具有一定意外损伤或者非常规损伤级别的飞行器,由具有规定技术水平的人员,利用规定的程序、方法和资源(设备、工具、备件、人力、

物流等)进行修理恢复时,恢复到规定任务能力状态所用的平均时间,可用下式表示:

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

式中: $Y$ 表示恢复时间; $m(t)$ 为恢复密度函数,即在 $\Delta(t)$ 时间内完成恢复工作的概率。

飞行器的恢复费用参数可使用意外损伤平均恢复费用MRCC(Mean Recovery Cost)来表征。MRCC即为具有一定意外损伤或非常规损伤级别的同一型号的飞行器,由具有规定技术水平的人员,利用规定的程序进行修理时,恢复到规定任务能力状态所使用的平均资源量,通常可用平均恢复费用来衡量。

飞行器的修复工时参数可使用意外损伤平均修复工时MWTTRC(Mean Work Time to Recovery)来表征。MWTTRC即为具有一定意外损伤或者非常规损伤级别的同一型号的飞行器,由具有规定技术水平的人员,利用规定的程序和资源进行修理时,恢复到规定任务能力状态所耗费的平均工时数。

显然,修复性是飞行器的一种固有特性,主要通过飞行器的设计过程来提高。具有高修复性的飞行器在发生意外损伤或者非常规损伤(如事故损伤、战伤)时,维修人员能够在有限条件下方便、快速地恢复飞行器的能力。特别是在战场环境下,高修复性对提高作战飞机的再次出动能力以及维持作战飞机机队规模具有重要意义,将直接影响战斗力的保持和战斗的胜负。

在修复受损飞行器时,由于受损程度与修理资源条件的不同,将导致表征修复性的参数值完全不同。飞行器的受损程度根据所遭受损伤的严重程度可以分为严重损伤(或不可修复损伤)、较严重损伤(即损伤较为严重,需要在大修厂才能修复)、中等损伤、轻度损伤和轻微损伤等<sup>[9-10]</sup>。当然,损伤也可以是别的分类方法。因此,在说明修复性参数要求时,要说明飞行器受损程度和修理资源条件。比如,“在大修厂条件下,对飞行器较严重损伤的修复时间不大于5小时”“在大修厂条件下,对飞行器较严重损伤的修复费用不大于500万元”“在大修厂条件下,对飞行器较严重损伤的修复工时不大于5000工时”等描述。在两级维修体制下,修理资源条件一般可以认为就是外场级和大修厂(制造厂)级两种条件。因此,也可以对修复性要求概括地描述为:“在两级维修体制下,对飞行器较严重损伤的修复时间不大于5小时或者修复费用不大于500万元或者修复工时不大于5000工时”等。

## 4 飞行器修复性的评估方法

作为飞行器的一种固有属性,修复性不仅是设计的,还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。按照“积木式”的试验思想,一般可以分为元件级、试件级、构件级或组件级、部件级和全机级五级进行试验工作,通过试验获取数据资料。修复性试验中的互换性等一些指标试验可以结合维修性、可保障性试验进行。针对意外损伤或非正规损伤如事故损伤、战斗损伤、鸟撞损伤等,则可以结合生存力试验、坠撞试验等进行,或者开展专门的试验工作加以研究。在完成相关试验测试后马上对损伤飞行器进行修复,进行修复性试验测试。

评价则是用一定的数学手段去分析试验测试数据,以便做出决策的过程。飞行器的修复性评估,需要首先进行修复性的试验,然后以试验的结果为基础,结合仿真、分析,做出对修复性的综合评价。当然,在缺乏试验数据时,也可以先进行仿真分析,结合传统经验给出结论,后面有条件时再对结论或指标进行试验验证<sup>[11]</sup>。

## 5 飞行器修复性的作用意义

首先,修复性对于保持飞行器的使用完整性(或者军用飞行器的作战完整性)具有重要的作用意义。

完整性一词已成为表征飞行器质量特性的一个重要概念<sup>[12-14]</sup>,在此基础上,文献<sup>[6~7,15~16]</sup>给出了军用飞机结构作战完整性的概念。传统的完整性是从执行既定任务能力的角度定义的,反映装备执行任务时的完好程度,需要的是结实、好用的装备。从完成既定任务能力的角度出发,反映装备在整个使用期间的持续完好程度,需要的是结实、好用、抗糙、好修的装备。因此,可以类似地给出飞行器在服役使用过程中的使用完整性的定义:飞行器在服役使用过程中,在要求的耐久性、保障性、安全性、任务能力、生存力和修复性水平下,飞行器处于完好的及功能未受到削弱的属性。特别地,对于军用飞行器,也可以称为作战完整性: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、任务能力、生存力和修复性水平下,飞行器处于完好的及功能未受到削弱的属性。事实上,飞行器的使用完整性或者军用飞行器的作战完整性,都是从飞行器完成任务的角度出发,考虑其全寿命周期特点来定义完整性的。上述定义中,生存力对于军

用飞行器来说主要是指面对敌方威胁时的生存能力;对于民用飞行器来说生存力是指在正常服役使用情况下面对意外损伤或非正规损伤时的生存能力。

与传统完整性概念相比,飞行器使用完整性增加了对生存力和修复性两个指标的要求,或者说原有完整性的概念与内涵得到了拓展。从飞行器完成既定任务的角度来说,原有的完整性指标——耐久性、保障性、安全性和任务能力,反映的是能否出动功能完好的飞行器去执行既定任务的问题;而新增的生存力和修复性,反映的是飞行器在使用时能否持续出动完成既定功能任务的问题。也就是说,从完成既定任务的角度来看,对飞行器的要求是:有装备可用→能及时出动→出动后是安全的→能执行既定任务→能抵抗意外损伤→能快速修复。比如,对于军用飞机,其使用完整性(或称为作战完整性)差的结果表现在如图1所示的6个方面。

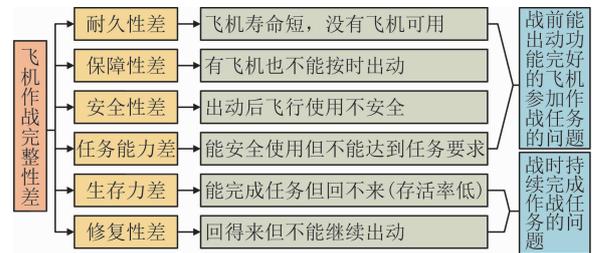


图1 军用飞机作战完整性差的表现结果

从上图可以看出,如果飞机的修复性不好,将直接导致军用飞机的作战完整性不好。也就意味着一旦飞机发生了意外损伤或非传统损伤(如战伤),就不能及时对其进行有效修复,这将直接影响其继续出动作战的能力。对于军用飞机来说,就是机队规模不能有效保持,直接影响战斗力的保持。对于民用飞机来说,类似地就是飞机不能及时恢复投入运营使用,直接影响航空公司的经济效益。

其次,修复性对于飞行器的使用完整性(对于军用飞行器,也可称为作战完整性)控制有着重要的作用。与军用飞机结构作战完整性的度量与控制<sup>[6-7]</sup>类似,飞行器使用完整性(或军用飞行器作战完整性)也是可以度量与控制的。飞行器使用完整性的控制,就是人们在飞行器的设计/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、任务能力、生存力和修复性)而开展的一系列活动过程。如:飞行器设计、工艺优化、系统改装、结构定/延寿、单机寿命监控(跟踪)、设计更改(修理、加强、更换等)、服役/使用计划调整、维修措施与计划调整等,其本质就是对飞行器使用完整性的调整控制过程。

对于军用飞行器,可以应用使用完整度或作战完整度  $I_0$ 。对其作战完整性进行度量。如果设定飞行器的完好度  $U$  就是结构完好度,  $D=1-U$  为损伤度,是结构在达到指定时间  $t$  时所产生的耐久性损伤的定量度量,用结构细节群的平均裂纹超越百分数来表示;  $A$  为可用度,是指在一定的保障水平(人员和备件)下,能正常出动的飞机数量占飞机总数的比例;  $S$  是飞行器安全度,表示飞行器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的概率;  $C$  是飞行器存活率,而  $F=1-C$  为飞行器失效率,是飞行器执行任务时发生功能任务失效/失败的的概率;  $S_0$  为生存力,是指在各种武器损伤和非计划载荷作用下,飞行器能够保持工作状态的概率。军用飞行器作战完整度  $I_0$ 。可由飞行器的完好度  $U$ 、可用度  $A$ 、安全度  $S$ 、存活率  $C$ 、生存力  $S_0$  和修复度  $R_c$  来综合表征。因此,  $I_0$  可表达为:

$$I_0 = f(U, A, S, C, S_0, R_c) \quad (3)$$

为简化目的,军用飞行器的完好度、可用度、安全度、存活率、生存力和修复度可以看作相互独立。如果将各影响参数对军用飞行器作战完整性的影响简单地以线性关系表示时,军用飞行器作战完整度模型可以表达为

$$I_0 = U \times A \times S \times C \times S_0 \times R_c \quad (4)$$

依据上述模型对军用飞行器的作战完整性进行控制时,可以看到修复性是与其可靠性、安全性等同等重要的特性。军用飞行器作战完整性存在“短板效应”,如果修复性得不到有效控制,将直接导致军用飞行器的作战完整度很低,甚至丧失作战完整性。其实际意义就是,如果军用飞行器的修复性很不好,一旦参加作战,发生战伤后就不能修复,那么随着战斗的进行,作战飞行器的机队规模将迅速缩小,直至完全丧失战斗力。对于民用飞行器的使用完整性的度量与控制的角度看,修复性的意义是同等重要的,只不过战斗力参量由经济性参量代替罢了。

## 6 飞行器修复性的设计方法

飞行器的修复性设计就是在飞行器设计的时候就要考虑到其在服役使用过程中不可避免会发生意外损伤或者非常规损伤。比如,飞行器在飞行中遭遇鸟撞、雷击等,军用飞行器在作战环境下遭受战伤等。既然这些损伤不可避免,那么就要考虑如何发生损伤后简便、快速、经济地修复。特别是对于军用飞行器、战伤飞行器的修复更是直接关系到战场上的胜败。

为了提高飞行器的修复性,通常有如下主要设

计方法。

1) 模块化设计。将模块化设计思想应用到飞行器各系统设计中,将使得飞行器在发生意外损伤时,只需要更换受损模块即可恢复其规定的功能状态。这种受损模块的更换往往是更快速、方便、经济的。通过模块化设计将显著提高飞行器的修复性。

2) 互换性设计。通过互换性设计,将使得飞行器同种部件之间在实体上及功能上能够彼此之间互相替换使用。在飞行器遭受意外损伤时,可对受损部件进行及时替换修理,实现损伤的快速修复。

3) 标准化设计。飞行器零部件采用标准化设计与制造,将有利于零部件的供应和储备,从而使得飞行器在发生意外损伤时更便于修复。比如,作战飞行器在战场环境下的战伤抢修,就可以采用换件或拆拼标准化的零部件对受损零部件进行快速修理,使得飞行器的修复性大为提高。

4) 可达性设计。飞行器在遭受意外损伤时,受损部位的可达性好,修复时不需要拆装其他零部件或者拆装简便,容易达到修复部位,同时还具有足够的操作空间。这些都使得修复工作更方便快捷地完成。

5) 测试性设计。飞行器具有良好的测试性时,对于遭受意外损伤的系统或零部件修复后,能够准确、快速、简便地检测诊断其状态,快速确认修理质量,从总体上提高了修复的速度和效率,缩短了修复时间。

6) 修复安全性设计。针对修复性所说的安全性,是指避免修理活动时人员伤亡或者设备损坏的一种设计特性。由于意外损伤的飞行器往往可能面临与平时使用维修工作所不同的场地、环境、损伤模式以及其他修理条件,这些都可能导致修理工作中发生不安全问题,从而导致修复工作失败。如果在飞行器的设计中预先考虑了这些问题,并进行了针对性地改进设计,就可以有效提高飞行器的修复性。

需要说明的是,通常所说的维修安全性<sup>[1]</sup>是指在正常的维修活动中避免人员伤亡和设备损坏的设计特性。而修复安全性是指在发生意外损伤时修复飞行器的活动中避免人员伤亡和设备损坏的设计特性。它们之间有相关联的地方,但本质上是不同的。

7) 修复工艺设计。飞行器发生意外或者非常规损伤时,损伤的部位与程度往往提前不能准确预测,而且修复时所处的环境场地可能生疏简陋,比如飞行器战斗损伤后迫降到陌生环境等。因此,要求进行飞行器修复性设计时就要考虑到降低修理人员的技能水平要求,对修复工具设备需求也尽可能简单,

便于保障。修复工艺设计得尽可能简单,便于操作,减少复杂的操作步骤和修理工艺要求,尽量采用换件修理或者简易的修理方法。例如,在设计中采用快锁连接方式、常规螺栓连接方式代替焊接方式,抽铆工艺代替常规铆接工艺、固体润滑工艺代替液体润滑工艺、非密封工艺代替密封工艺、常温环境工艺代替高温高湿或恒温恒湿环境工艺等都是修复工艺设计的有效方法。在紧急情况下,如在战斗情况下的战伤修复,还可以采用切换、剪除或旁路、拆换、替代、重构、原件修复、制配等工艺方法。

8)修复人素工程学设计。意外损伤飞行器的修复工作往往在条件不好的环境下进行,有的还在陌生的野外条件下进行。修理人员的修理工作效率、质量与疲劳等方面都会存在问题。在飞行器的设计过程中就应当考虑到一旦这些特殊情况发生了,修理过程中应如何让修理人员有尽可能好的工作姿势、工作条件以及适度的劳动强度,以便较好地提高修理人员的效率和工作质量,使受损飞行器得到及时修复。

9)结构拓扑优化设计。在结构修复性设计的过程中,可以将拓扑优化设计的方法引入,使得结构在满足修复性要求的情况下构型最优,从而减轻结构的重量,提高结构的效能。

类似地,对于其他装备、产品及其子系统,比如飞船、汽车、手机等,修复性的概念、要求和度量表征方法同样适用,修复性评估与设计方法也是类似的。

通过设计使得飞行器的修复性得到提高的同时,可以看到其可能影响到飞行器的其他特性的变化,甚至是降低。如采用组合化的飞行器结构型式代替整体化的结构型式,可以显著提高结构的修复性,但是却降低了结构的可靠性与维修性。这些也正说明飞行器的设计是一个综合权衡设计过程,最后要的是综合性能最好的设计,而不能只追求某一个特性最好而牺牲其他特性。

## 7 飞行器修复性设计的简要示例

图2(a)的飞机机翼,是典型的单块式后掠机翼结构型式。该机翼由典型的翼肋、桁条、蒙皮组成。在正常服役使用的情况下,该机翼的受力与传力特性都很好。但是,如果该机翼的某个部位发生了意外损伤,比如在使用中由于意外碰撞使得机翼翼尖部位发生了较严重的损伤,导致几根桁条断裂变形、较大面积的蒙皮开裂破坏,见图2(b)。此时,要对受损的机翼进行修复时,只能按如下步骤进行:首先对受损的桁条、蒙皮结构进行切割清除;再对各个受

损的桁条采用换段补强连接的方法修补上缺失的桁条部分;最后再覆盖修补上缺损的蒙皮。这一过程中可以看出,修复的工艺复杂,需要的修理工具类型多,对修理人员的技能水平要求高,修复周期长,修复费用高。

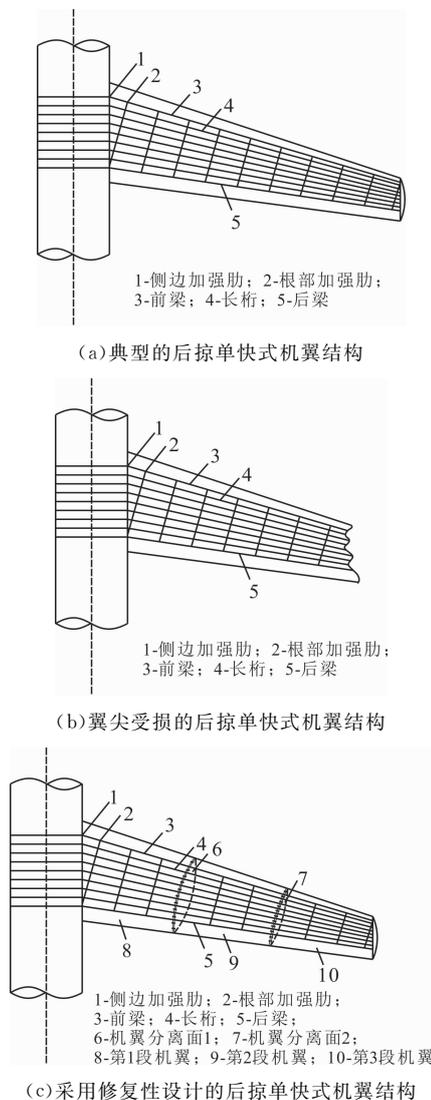


图2 飞机单块式机翼修复性设计原理图

如果对该机翼进行修复性设计,该机翼结构可以设计成由几段组合而成的组合结构,见图2(c)。该机翼如果发生了相同的意外损伤,则只需要将受损的机翼翼尖段部分采用成品组件直接更换掉即可。这时的修复工作内容就变成了主要是非常简单的拆装连接螺栓了,修复时间、修复效率都将大大提高。如果是对于军用飞机遭受战斗损伤的情况,这将使得战伤飞机可以快速得到修复,恢复其作战能力,为战斗胜利提供直接支持。

通过示例可以看出,在飞行器的设计时将修复性作为一个重要的固有特性进行先期设计,将大大提高飞行器遭受意外或非传统损伤时的修复能力,对于受损飞行器再次投入服役使用、保持机队规模

具有重要意义。

## 8 结论

围绕飞行器在遭受意外或非正常损伤时是否容易修复的问题,本文开展了以下工作:

1)阐述了飞行器修复性、飞行器使用完整性/军用飞行器作战完整性以及飞行器使用完整性/军用飞行器作战完整性控制等基本概念;

2)阐明了飞行器修复性的定性要求及度量表征方法,提出了飞行器修复性的基本评估和设计方法。

3)结合飞行器使用完整性/军用飞行器作战完整性的度量与控制,论述了飞行器修复性的作用意义。

4)给出了一个飞行器典型的后掠单快式机翼结构修复性设计简要示例。

同时,修复性的概念、要求、度量表征及设计方法以及使用完整性/作战完整性的概念、度量与控制方法等对于其他装备、产品及其子系统,比如飞船、汽车、手机等是同样适用的,但这方面还有很多工作要做。

### 参考文献(References):

- [1] 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 Aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 张弘. 通用飞机作抗坠撞设计指南[M]. 北京:航空工业出版社, 2009.  
ZHANG H. Design Guidelines of General-Purpose Plane Anti-the Drop and Crash[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [5] 李曙林, 常飞, 何宇廷, 等. 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, CHANG F, HE Y T, et al. Survivability Analysis and Evaluation of Military Aircraft in Operational Use[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] HE Y T, ZHANG T, MA B L, et al. Structural Integrity Control Technology Based on Structural Damage Monitoring[M]//ICAF 2019 - Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing. Cham: Springer International Publishing, 2019: 938-955.
- [8] 陈学楚. 现代维修理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.  
CHEN X C. Modern Maintenance Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 王莉莉, 陈云翔, 欧阳洁. 基于可用度的军用飞机可靠性指标确定方法[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(3): 163-169.  
WANG L L, CHEN Y X, OUYANG J. Approaches to Setting Reliability Criterion of Military Aircraft Based on Availability[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(3): 163-169. (in Chinese)
- [12] USA Department of Defense. Aircraft Structural Integrity Program (ASIP) [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1530D(USFA), 2016.
- [13] 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)
- [14] USA Department of Defense. Mechanical Equipment and Subsystems Integrity Program [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1798C(USFA), 2013.
- [15] USA Department of Defense. Engine Structural Integrity Program (ENSIP) [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1783(USFA), 1984.
- [16] USA Department of Defense. Avionic Integrity Program (AVIP) [Z]. Department of Defense Standard MIL-STD-1796A(USFA), 2011.

(编辑:姚树峰)