

# 军用飞机结构易损性分析

李寿安<sup>1</sup>, 李曙林<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学工程学院研究生二队;

2. 空军工程大学工程学院飞机发动机工程系, 西安, 710038)

**摘 要:** 提出了分析军用飞机结构易损性的一种方法, 对单个打击下飞机结构易损性进行了数学推理, 并计算了两种不同结构布置的飞机模型的易损性。最后, 对降低结构易损性提出了一些要求和措施。

**关键词:** 致命性部件; 生存力; 易损性

**中图分类号:** V 22

**文献标识码:** A

## ANALYSIS OF STRUCTURAL VULNERABILITY ON BATTLE PLAN

LI Shou-an<sup>1</sup>, LI Shu-lin<sup>2</sup>

(1. Engineering College, AFEU;

2. Dept. of Aircraft and Engine Engineering of the Engineering College, AFEU, Xi'an, 710038)

**Abstract:** The paper presents a method to analyze structural vulnerability of battle plan, concludes mathematically the vulnerability under single hitting, and calculates the vulnerability of two battle plan models of different structure distribution. In the end, requirements and measures are presented to decrease structural vulnerability on battle plan.

**Key words:** lethal components; survivability; vulnerability

军用飞机的作战生存力是指飞机躲避或承受人物敌对环境的能力<sup>[1, 2]</sup>, 它对降低飞机在战争中的损失, 减少飞行员的牺牲, 维持作战飞机的数量, 从而保证军队的战斗力有极重要的意义。海湾战争期间, 以美国为首的多国部队出动飞机超过 10 万架次, 只有 30 架飞机被击落, 其中一个重要原因就是飞机设计中考虑了生存力增强技术。飞机作战生存力已成为作战飞机的重要指标之一, 它分为敏感性和易损性两个方面。敏感性是指飞机在完成任务中不能避免被损伤和被击中的可能性, 由飞机被损伤机理命中的概率  $P_H$  来衡量; 在敏感性  $P_H$  的基础上, 飞机无法承受由敌对环境引起的杀伤的能力称为飞机对杀伤机理的易损性, 易损性分析是生存力分析中重要的一面, 易损性由给定威胁条件下一次命中后被杀伤的条件概率  $P_{KH}$  来度量<sup>[2]</sup>。军用飞机要提高战斗生存力, 最重要的是减少易损

性。飞机上有一些重要的结构部件, 一旦在飞行作战中被损伤或失效, 飞机就无法完成预定的任务。本文从结构部件出发, 对军用飞机结构的易损性作一些分析。

### 1 易损性的一种分析方法

提高飞机生存力主要体现在降低系统的易损性。飞机上每个部件都有一定水平、一定程度的易损性, 每个部件的易损性对全机的易损性起着部分的作用, 一些部件比其它部件的易损性大。飞机上的致命性部件是那些如果被损伤或毁坏后会导致飞机被杀伤的部件。对部件和全机的易损性的综合描述和图解就是易损性分析。飞机的易损性取决于以下的因素: 致命性部件在经受给定打击后继续工作的能力; 可以避免与抑制对致命性部件损伤的飞机设计手段; 相应的易损性减缩装置。

易损性分析的内容包括:① 选择要研究的飞机杀伤水平;② 对飞机技术、功能总的描述;③ 确定飞机结构的致命性部件;④ 致命性部件易损性的确定及其对全机易损性的影响。

易损性分析流程如图1。

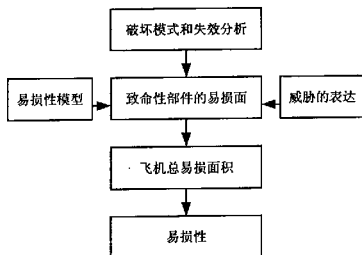


图1 易损性分析流程图

### 1.1 飞机杀伤水平

易损性是针对飞机杀伤而言的,因此必须确定用于测定飞机功能降低程度的飞机杀伤水平<sup>[2]</sup>。飞机杀伤水平一般包括:损耗杀伤、任务放弃杀伤。损耗杀伤是一种飞机损伤程度的度量,它使飞机无法修复或不值得修复而被放弃,将该飞机从编制中去掉。任务放弃杀伤是指飞机的破坏程度使它无法完成规定任务,但尚不足以将它从编制中去掉。

### 1.2 飞机描述

在易损性分析开始之前,应尽量收集飞机的每一个主要系统的技术与功能描述。每一个系统的技术描述应当包括所有子系统和部件的位置、尺寸、材料、构成和作用。功能描述则应提供每一个部件的功能,包括余度。对于一个详尽的描述,需要提供透视图、简图、成比例的三面图、详细的机内布置图以及大量的剖面图,通过飞机描述应知道部件与系统在飞机上如何工作,以及它们的损伤或失效与全机飞行作战之间的关系。

### 1.3 确定飞机结构的致命性部件

致命性部件定义为该部件如果被损伤或者毁灭,会产生一个已定义或可定义的飞机杀伤水平。对于易损性分析,首先是根据飞机杀伤水平及飞机技术、功能的描述,确认那些损伤或失效后会导致飞机被杀伤的部件,该过程叫做致命性部件分析。致命性部件分析的第一步是确认飞机为持续飞行和完成任务而必须执行的基本功能;第二步是确认执

行这些基本功能的主要系统和子系统;第三步是进行损伤或失效模式和结果分析,来了解单独部件或子系统失效模式的每种可能形式与完成基本功能之间的关系;第四步是将部件或子系统的损伤或失效模式与战伤相联系,从而确定致命性部件。

### 1.4 致命性部件易损性的确定及其对全机易损性的影响

要预测结构系统的易损性,就必须对系统的构件、损伤或失效模式,以及这些模式对系统功能的影响具有全面的了解,确定飞机结构的致命性部件及其易损性,从而确定飞机结构的总易损性。

#### 1.4.1 致命性部件易损性的确定

除  $P_{K/H}$  外,易损性也可用易损面积  $A_v$  来度量,对结构元件而言,易损面积  $A_v$  是元件的现有面积  $A$  和元件被一次击中情况下发生致命性损伤的概率  $P_{K/H}$  的乘积<sup>[2, 3]</sup>。

飞机结构由众多致命性部件构成,一般第  $i$  个致命性部件的易损面积由  $A_{vi}$  表示,第  $i$  个部件的易损面积  $A_{vi}$  定义为部件在垂直于损伤机理的发射线的平面内的暴露面积  $A_{pi}$  与部件在给定打击下的杀伤概率  $P_{K/hi}$  的积,即:

$$A_{vi} = A_{pi} \times P_{K/hi} \quad (1)$$

由于  $A_{pi}$  与  $P_{K/hi}$  一般均为威胁方向或方位角的函数,所以易损面积也随着方位角变化。

在飞机上给定的一个随机打击,第  $i$  个部件的杀伤概率  $P_{K/hi}$  是,该部件被击中的概率  $P_{h/hi}$  与在部件上的给定打击的杀伤概率  $P_{K/hi}$  之积。即:

$$P_{K/hi} = P_{h/hi} \times P_{K/hi} \quad (2)$$

由(1)式得到:

$$P_{K/hi} = A_{vi}/A_{pi} \quad (3)$$

若作用于飞机上的打击是随机的,  $P_{h/hi}$  可由

$$P_{h/hi} = A_p/A_p \quad (4)$$

给出,这里  $A_p$  是全机在垂直于威胁逼近方向的平面内的暴露面积。

从而根据(2)、(3)、(4)式,对作用于飞机上的任何随机打击,第  $i$  个部件的杀伤概率可用下式表示。

$$P_{K/hi} = A_{vi}/A_p \quad (5)$$

#### 1.4.2 全机易损性分析

全机易损性是各个致命性部件易损性的综合表现,全机易损性并不是致命性部件易损性的简单相加。致命性部件的余度设计和结构布局对飞机易损性有很大的影响,致命性部件之间相互也有一定的影响。

有余度的致命性部件一个被损伤后,可以提供另一个完成其功能,此时对飞机易损性并无影响。当致命性部件重叠并互相影响时,飞机易损性分析就是一件非常复杂的事情。分析飞机易损性,考虑致命性部件的余度和结构布局是十分重要的。

在单个威胁的打击下,若飞机上致命性部件无余度也无重叠,则飞机的易损面积  $A_V$  和易损性  $P_{KH}$  可以表示如下:

$$A_V = \sum_{i=1}^N A_{Vi}, \quad P_{KH} = \sum_{i=1}^N A_{Vi}/A_P \quad (6)$$

$N$ —致命性部件的数目。

若飞机上致命性部件无余度但有重叠,重叠区域的面积  $A_{P0}$  由其几何轮廓尺寸确定,在重叠区域内沿一条射击线可能有多重致命性部件。

本文把重叠区当作一个致命性部件来考虑,则飞机在受到单个打击后,重叠区的杀伤概率  $P_{KH0}$  与易损面积  $A_{V0}$  可表示为:

$$\begin{cases} P_{KH0} = 1 - \prod_{i=1}^C (1 - P_{KHi}) \\ A_{V0} = A_{P0} \times P_{KH0} \end{cases} \quad (7)$$

当飞机上致命性部件既有余度又有重叠时,飞机结构易损性一般难以用数学公式表示。

本文主要讨论易损性的一种分析方法,对其余问题不予深入分析。

## 2 算例分析

如图 2,某单个打击下简化的飞机模型的致命性部件由飞行员 P、发动机 E 及油箱 F 组成,模型 A 致命性部件无重叠区,模型 B 致命性部件发动机与油箱有重叠区。

现在分析两模型的易损面积  $A_V$  与易损性  $P_{KH}$ 。

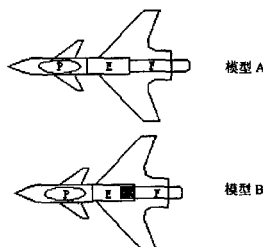


图 2 某单个打击下飞机模型图

其原始数据与计算结果均列入表 1。

其中由 (7) 式可算出重叠区的易损性  $P_{KH0}$  为:

$$P_{KH0} = 1 - (1 - 0.3)(1 - 0.6) = 0.72$$

表 1 某单个打击下飞机模型 A、B 易损性数据表

模型 A 的原始数据与结果				
致命性部件	$A_{Vi} (ft^2)$	$P_{KHi}$	$A_{Vi} (ft^2)$	$P_{KHi}$
飞行员	4	1.0	4	0.013
油箱	60	0.3	18	0.060
发动机	50	0.6	30	0.100
飞机	$A_P=300$		$A_V=52$	$P_{KH}=0.173$

模型 B 的原始数据与结果				
致命性部件	$A_{Vi} (ft^2)$	$P_{KHi}$	$A_{Vi} (ft^2)$	$P_{KHi}$
飞行员	4	1.0	4	0.013
油箱	60-10	0.3	15	0.050
发动机	50-10	0.6	24	0.080
重叠区	10	0.72	7.2	0.024
飞机	$A_P=300$		$A_V=50.2$	$P_{KH}=0.167$

从表 1 数据可得,重叠布置致命性部件可以降低飞机的易损性。

## 3 降低飞机易损性对飞机结构的要求和措施

在考虑生存力设计中,从飞机任务基本武器最初设计阶段开始,就应考虑降低飞机易损性要求,同时应适当考虑其它设计约束因素,如可靠性、安全性、维修性。应当在权衡这些因素的同时最大限度地降低易损性。降低易损性的一般技术要求和措施包括<sup>[2, 4, 5]</sup>:采用余度措施,余度系统的充分隔离;合理布置和遮挡关键分系统;损伤容限和抗损设计;以及装甲防护。

### 3.1 余度设计和余度隔离

余度设计,就是采用完全一样的或备份的分系统来完成相同的基本功能,使战斗中潜在的损失能得到实质性降低<sup>[4, 5]</sup>。余度设计既可以提高战斗力,又可以提高安全性和可靠性。但对易损性而言,只有将余度系统充分分离开来,才能发挥余度措施的最佳效果。余度分离距离越大,余度设计的效果越佳。采用余度分离的例子很多,如目前飞机上采用的多台发动机,两个飞行员,两套操作系统等,就是余度隔离的例子。

### 3.2 部件布置

部件布置是指将关键部位布置在适当位置,降低威胁机理产生致命性破坏的概率,从而降低易损性。部件布置包括<sup>[4, 5]</sup>:使用非关键部件或较坚韧的部件遮挡关键部件;紧密布置或重叠布置关键部件,以减少飞机易损面积或给威胁机理提供最小的

方位范围;布置或隔离部件,以便消除或减少连续性损伤发生的概率。如将每套飞控操纵杆和双控制系统的电缆布置在飞机的两边。

### 3.3 损伤容限和抗损设计

采用损伤容限设计技术,使一些基本的部件和结构能承受一定的损伤,而不影响基本飞行任务的完成,从而降低飞机结构易损性<sup>[7]</sup>。但这种损伤容限有一个限制,即剩余强度要求,剩余强度准则即是判别最大损伤尺寸的依据。

### 3.4 机体装甲防护

采用机体装甲技术可以给致命性部件提供有效的防护。例如对易燃物通常使用防火涂层。

## 4 结论

本文在飞机结构易损性分析理论上,提出一种考虑致命性部件有重叠时的易损面积和易损性

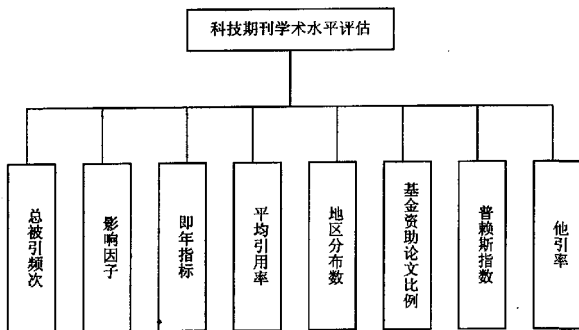
的分析方法,并以一个算例计算了两种模型的易损性。计算结果表明:采用部件重叠布置,可较好地降低飞机结构的易损性。最后讨论了降低飞机结构易损性的一些方法与措施。

### 参考文献:

- 1 Robert E. Ball. The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985
- 2 林光宇,宋笔锋.飞机作战生存力分析与设计基础[M].北京:航空工业出版社,1998
- 3 Remers D. T.. Design for Reduction of Aircraft Vulnerability. AGARD Conference Proceeding No. 2,1975
- 4 HB/Z266-94. 常规武器威胁下提高飞机生存力的设计和评估指南[S]. 中国航空工业总公司,1994.10
- 5 中国航空工业总公司.飞机机体非核生存力[M].1995.9

## 科技期刊学术水平评估体系简介

科技期刊是反映科学技术产出水平的窗口。一个国家,一个学校的科技水平的高低,很主要的侧面是从其学术期刊的状况得以反映。所以,评估科技期刊的学术水平,不仅仅是对刊物本身,也是对国家和学校科技学术水平的评估。在此,将国家科技部中国科技信息研究所采用的评估体系简介于下,供读者思考。



**总被引次数:** 期刊历年发表的论文,在评价当年被其他期刊和期刊本身引用的总次数。它是表明该期刊在科学交流中被利用的程度。是评估期刊学术水平的一个很重要指标。

**影响因子:** 该期刊近两年的文献,被其他期刊和期刊本身平均的引用率。即该期刊前两年发表的论文,在评价当年其论文被引用的篇平均值。其值越大,表明该期刊的学术水平越高,相对来说该期刊的影响也越大。也是期刊学术水平评估中的一个重要指标。