

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220442-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220442

航空发动机易损性仿真与评估技术研究

李兆红¹, 邢 洋¹, 裴 扬², 柴 政¹, 郭鹏超³

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

3. 中国航发动力股份有限公司, 西安 710021)

摘 要: 为提高飞机的作战生存力, 提出了一种航空发动机易损性评估的计算仿真方法。以某型发动机为对象, 对发动机致命性部件进行识别, 建立了发动机易损性评估模型, 选取弹丸作为典型威胁, 使用易损性仿真分析软件对发动机杀伤概率等易损性指标进行量化计算。根据开发的易损性计算软件计算结果, 方向 1 和方向 7, 压气机机匣、低压转子和高压转子的 B 级杀伤概率较高。考虑可能落实的发动机易损性缩减措施, 提出针对发动机的易损性设计改进建议, 并通过算例计算分析改进效果。提出的方法对于航空发动机防护以及生存力设计有指导意义。

关 键 词: 生存力; 易损性; 损伤模式; 杀伤概率; 缩减设计

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Research on simulation and evaluation technology of aero-engine vulnerability

LI Zhaohong¹, XING Yang¹, PEI Yang², CHAI Zheng¹, GUO Pengchao³

(1. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Aviation Power Compony Limited, Aero Engine Corporation of China, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the combat survivability of aircraft, a computational simulation method for aircraft engine vulnerability assessment was proposed. Taking a certain type of engine as an object, the lethal components of the engine were identified, the vulnerability assessment model of the engine was established, then the projectile was selected as a typical threat, and the vulnerability simulation analysis software was used to quantify the vulnerability indicators such as the engine kill probability. According to the calculation results of the developed vulnerability calculation software, for direction 1 and direction 7, the level B kill probability of compressor inner casing, low-pressure and high-pressure rotating shafts was high. Considering possible measures to reduce the vulnerability of the engine, suggestions for improving the vulnerability design of the engine were put forward, and the improvement effect was analyzed by calculating an example. The proposed method has guiding significance for aero-engine protection and survivability design.

Keywords: survivability; vulnerability; damage mode; kill probability; reduction design

收稿日期: 2022-06-20

作者简介: 李兆红(1976—), 男, 研究员, 硕士, 主要从事航空发动机总体设计技术研究。

引用格式: 李兆红, 邢洋, 裴扬, 等. 航空发动机易损性仿真与评估技术研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220442. LI Zhaohong, XING Yang, PEI Yang, et al. Research on simulation and evaluation technology of aero-engine vulnerability[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220442.

航空发动机是作战飞机的关键与易损系统之一,对飞机整机生存力有着重要影响。发动机进行生存力设计,可以有效提高飞机生存力,降低飞机的损失率。为了对发动机进行生存力设计,需要对发动机易损性指标进行量化计算。

在西方国家,人们逐渐意识到飞机易损性设计的重要性,美国军方已经把飞机易损性设计作为飞机设计中的重要组成部分,同步开发了多种飞机易损性计算模型,如 FASTGEN、JSEM 等^[1-3]。相比而言,我国从 20 世纪 90 年代初才开始对飞机易损性开展研究,李金瑞等提出一套计算、评估、分析飞机易损性的方法,并建立某型飞机的易损性分析模型^[4];杨哲等针对实际作战中飞机主要受敌方导弹破片的威胁,提出了一种导弹破片威胁下的飞机易损性分析模型^[5];卢军民等为提高固定翼飞机的战斗生存能力,提出了一种飞机易损性评估的计算机仿真方法^[6]。

目前,国内外易损性研究主要集中在飞机本体上,对航空发动机易损性研究尚少。本文以典型航空发动机为例,对航空发动机致命性部件进行识别,建立航空发动机易损性模型,使用开发的易损性仿真软件计算评估航空发动机易损性指标。最后通过迭代分析发动机易损性缩减措施,对发动机提出生存力设计的改进建议。

1 发动机易损性评估基本原理

1.1 发动机易损性

航空发动机易损性定义为:在某种人为敌对环境下,由于遭受某种等级的威胁机理而使完成任务的能力受到限定等级的降低的一种特性。航空发动机易损性评估就是计算在常规作战任务中可能遭受枪、炮、导弹等传统弹道威胁的杀伤概率 $P_{k/h}$ 和易损面积 A_v 。发动机的杀伤概率 $P_{k/h}$ 的计算公式如下:

$$P_{k/h} = A_v / A_p \quad (1)$$

式中 A_p 为发动机的暴露面积,指发动机在垂直于威胁攻击方向平面内的投影面积。

1.2 计算理论

常规武器威胁条件下的航空发动机易损性仿真分析软件,是根据发动机杀伤机理,按照一定的数学模型,对发动机与弹丸遭遇进行模拟,计算发动机易损性指标。软件主要包括发动机几何建模、威胁建模、交会参数建模等模块。

几何建模主要功能是通过发动机部件的损伤模式影响分析,根据杀伤等级进行致命性与非致命性部件划分,定义部件材料特性,通过三角形或者四边形面元完成发动机几何外形逼近。威胁建模则是将航空发动机的威胁物(如弹丸)通过参数进行表征。交会参数建模主要是定义威胁攻击方向和起爆控制典型参数。各模块建模完毕后,可进行易损性计算,求得 A_p 与 A_v 。

A_p 与 A_v 计算可依据射击线扫描方法进行,其扫描原理见图 1。将长为 w 、宽为 h 的平面网格投影在模型上,随机产生的 N 条射击线在网格内扫描,判断射击线是否击中致命性部件,若击中且毁伤,则累积易损面积^[7-8]。

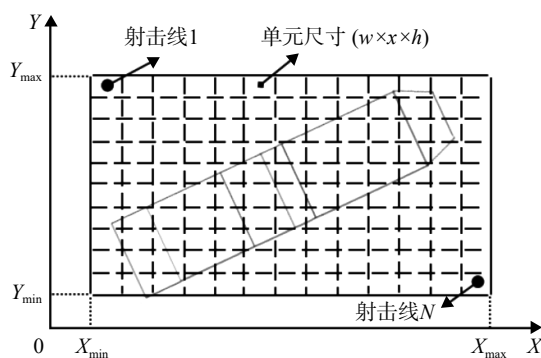


图 1 射击线扫描原理图

Fig. 1 Schematic diagram of firing line scanning

给定部件被弹丸击中且毁伤的概率为 $P_{k/h}$,其中下标 k/h 表示部件被命中且被杀伤这一事件。当某一个部件被弹丸击中之后,其是否被杀伤与弹丸的质量、速度、形状、尺寸和打击方向等因素相关。概率函数 $P_{k/h}$ 可以作为单枚弹丸打击下部件毁伤的判据,通常以经验公式或者拟合曲线形式出现,本文参考 Robert 的研究^[9],发动机各个部件的概率函数取值如图 2 所示。

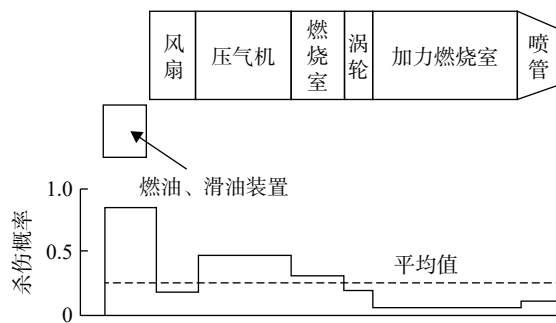


Fig. 2 Conditional kill probability function for each engine component

针对每条射击线,需要分析在目标内部的运动情况,可利用弹丸 THOR 穿透方程^[10]进行分析,根据面元的材料特性计算是否穿透。如果弹丸从部件内部穿过,则计算出弹丸的剩余质量和剩余速度,继续与下一面元进行交汇,直到弹丸的剩余速度为零或者穿透所有部件。

综上,当发动机受到单次打击的情况下,易损面积等于每个网格单元易损面积之和, A_v 可表示为式(2):

$$A_v = \sum_{j=1}^N P_{k/h_j} \times w \times h \tag{2}$$

式中 P_{k/h_j} 为网格单元杀伤概率,则发动机的杀伤概率 $P_{k/h}$ 的计算公式由式(1)转换如下:

$$P_{k/h} = A_v/A_p = \left(\sum_{j=1}^N P_{k/h_j} \times w \times h \right) / A_p \tag{3}$$

2 发动机易损性建模

2.1 几何模型

本文建模对象为混合排气小涵道比涡扇发动机。鉴于发动机零部件数量过于庞大会造成易损性计算过程耗时过长,占用资源过多,为此对航空发动机的几何模型进行适当的简化,用基本的几何形状(如圆柱面、球面和长方形)进行替代,保证外形具有较高的相似度。考虑到发动机在受到威胁打击时,飞机其他装置可能起到遮挡作用,为使航空发动机易损性计算更符合实际情况,除了建立航空发动机的模型,也建立了飞机几何外形以及具有较大遮挡作用的结构和系统模型。

模型中每一个部件对应有其材料和厚度属性,通过进行网格划分得到的飞机及发动机有限元网格模型如图 3、图 4 和图 5 所示。

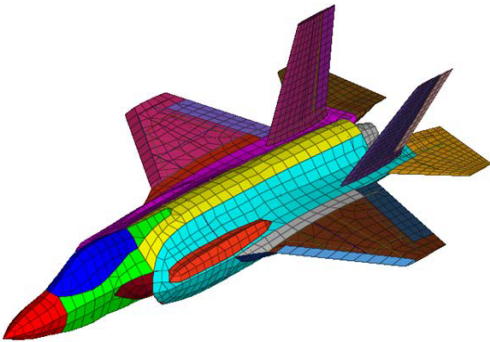


图 3 飞机有限元网格模型
Fig. 3 Finite element grid model of aircraft

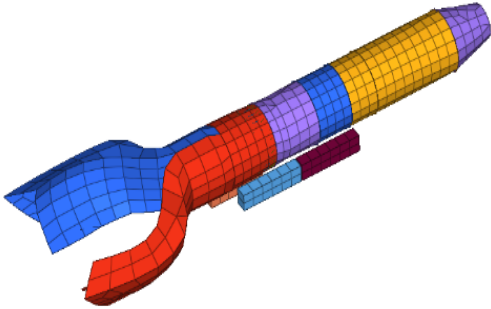


图 4 发动机有限元网格模型
Fig. 4 Finite element grid model of engine

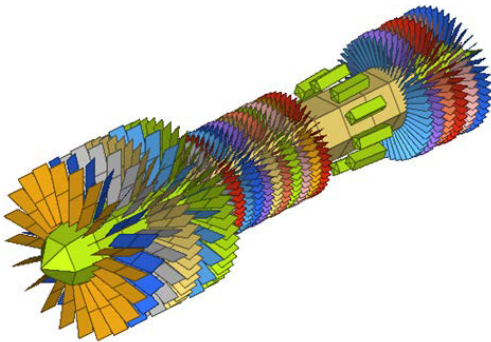


图 5 发动机内部有限元网格模型
Fig. 5 Finite element grid model of engine interior

2.2 威胁模型

以非爆弹丸威胁为例,弹丸的描述可以采用以下参数:材料强度、材料弹性模量、材料密度、材料声速、弹丸直径、弹丸质量和弹丸形状等,具体的弹丸威胁参数如表 1 所示。

表 1 弹丸的基本参数
Table 1 Basic parameters of projectile

参数	数值及说明
强度/MPa	345
弹性模量/GPa	200
材料声速/(m/s)	6 350
材料密度/(kg/m ³)	7 850
弹丸直径/mm	24
弹丸质量/g	35.5
弹丸形状	球形

2.3 交会参数定义模块

进行易损性计算需要设置弹丸相对于发动机的攻击方向。如图 6 发动机总体坐标系中射击线 OP 在 XOZ 平面上的投影为 OQ , 俯仰角 ϕ 定义为 OQ 转到 OP 所经过的角度,方位角 ψ 可以定义为 X 轴顺时针转到 OQ 所经过的角度。通过调整俯仰角 ϕ 和方位角 ψ ,可以模拟弹丸在空间任意方向对发动机进行打击。本文评估 26 个标准攻

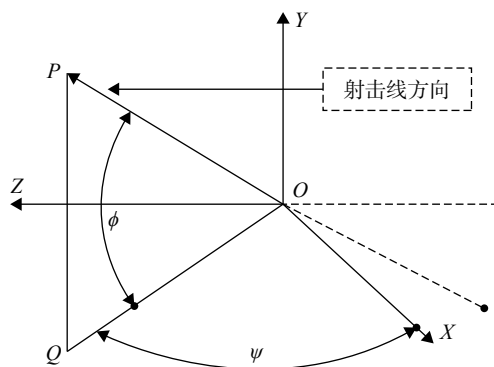


图 6 攻击方向定义

Fig. 6 Attack direction definition

击方向^[11]的打击对发动机易损性的影响。

2.4 致命性部件识别

若进行发动机易损性评估,需要确认哪些部件受到损伤或破坏后会导致发动机被杀伤。杀伤等级定义能够更清晰地确定杀伤后发动机功能降低的程度,发动机致命性部件不同,杀伤等级也有所不同。参考飞机杀伤等级定义^[12],本文用于易损性建模与评估的发动机部件杀伤等级选取 B 级(遭到打击后,30 min 内其损伤将引起飞机失控而坠毁)和 C 级(遭受打击后的破坏程度使飞机无法完成规定任务,但是不足以将它从编制中去掉)杀伤。B 级杀伤的易损部件为:燃油与控制装置、滑油装置、内涵流道部件、附件传动装置、低压转子和高压转子等;C 级杀伤的易损部件为:进气道、外涵机匣和加力燃烧室壳体等^[13]。

3 易损性指标计算

3.1 发动机整机易损性指标分析

在进行航空发动机易损性计算过程中,除发

动机部件外,假定飞机的外形、结构及其他系统部件均不作为致命性部件,这些部件对于发动机部件起到遮挡保护作用。

发动机整机在 26 个攻击方向上的暴露面积如图 7 所示。

图 7 中可以看出,航空发动机在方向 1(ϕ 为 0° , ψ 为 0°)和方向 5(ϕ 为 0° , ψ 为 180°)的暴露面积最小。在方向 25(ϕ 为 90° , ψ 为 0°)和方向 26(ϕ 为 -90° , ψ 为 0°)的暴露面积最大,此外水平方向(方向 1~方向 8)的暴露面积明显小于其他方向的暴露面积。

图 8 给出了发动机整机在 26 个攻击方向上的 B 级及 C 级杀伤概率 $P_{k/h}$ 。攻击方向为方向 1 和方向 7(ϕ 为 0° , ψ 为 270°)时, B 级 $P_{k/h}$ 最大,分别为 0.005 031 和 0.005 110。对于 C 级,攻击方向为方向 3(ϕ 为 0° , ψ 为 90°)和方向 7 时, $P_{k/h}$ 最大,分别为 0.054 479 和 0.052 856。

3.2 发动机部件易损性指标分析

发动机部件不同攻击方向上被击中后的杀伤概率一般不同,在易损性数据分析时,可以根据实际需求对某一个或者几个攻击方向上的部件 $P_{k/h}$ 值进行单独排序^[14]。以 B 级杀伤方向 1 和方向 7 为例,在这两个方向上的杀伤概率最大的五个部件及其易损性指标杀伤概率、易损面积和暴露面积分别如表 2 和表 3 所示。

从表 2 和表 3 可知,对于方向 1 和方向 7,压气机机匣、低压转子、高压转子以及燃油控制装置的 B 级杀伤概率较高,需要采取一定的易损性缩减措施进行保护或者作战中尽量避免在高易损性方向与威胁遭遇。

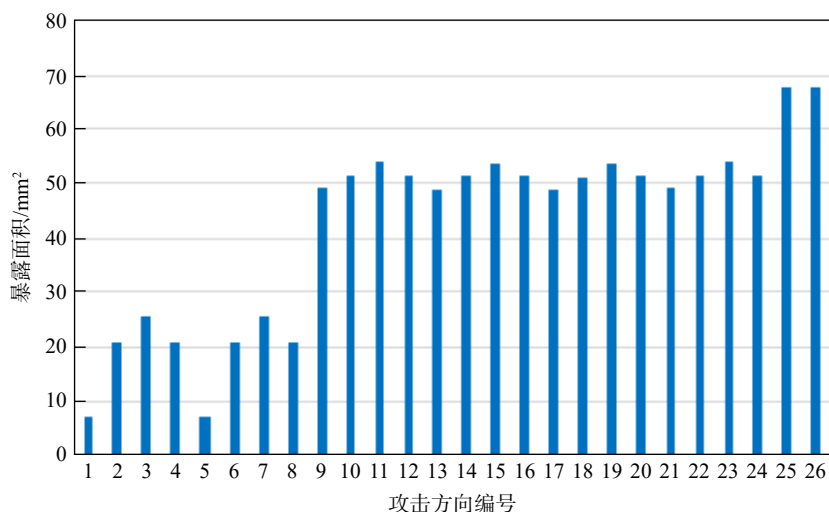


图 7 发动机的暴露面积

Fig. 7 Exposed area of engine

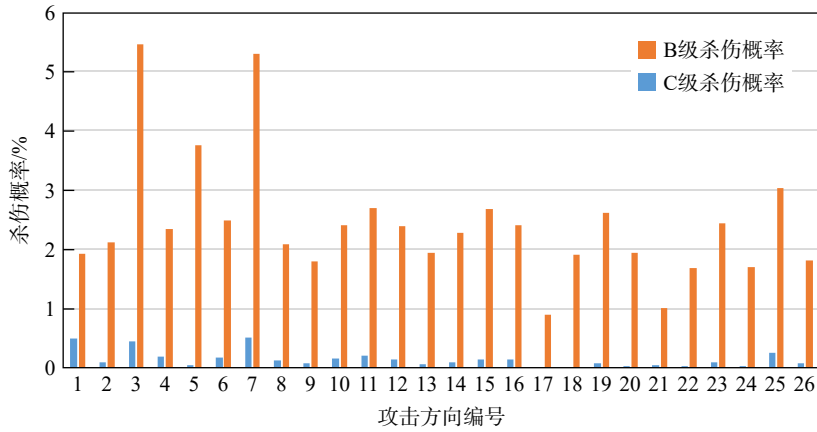


图 8 发动机杀伤概率

Fig. 8 Kill probability of engine

表 2 方向 1 发动机部件 B 级易损性指标

Table 2 Direction 1 class B vulnerability indicator of engine components

部件名称	$P_{k/h}$	A_v/m^2	A_p/m^2
压气机机匣	0.139 403	0.000 349	0.002 5
低压转子	0.131 038	0.014 087	0.107 5
高压转子	0.128 352	0.012 514	0.097 5
燃油控制装置	0.070 358	0.003 518	0.05
燃烧室机匣	0.068 936	0.001 379	0.02

表 3 方向 7 发动机部件 B 级易损性指标

Table 3 Direction 7 class B vulnerability indicator of engine components

部件名称	$P_{k/h}$	A_v/m^2	A_p/m^2
燃油控制装置	0.257 173	0.092 582	0.36
压气机机匣	0.194 254	0.026 224	0.135
低压转子	0.111 964	0.004 758	0.042 5
高压转子	0.100 821	0.000 504	0.005
涡轮机匣	0.057 3	0.003 438	0.06

4 易损性缩减

发动机易损性评估的目的是研究发动机致命性部件的易损程度,指导发动机易损性缩减设计。本文选择机匣加厚和部件遮挡方式来降低发动机的易损性,其中机匣加厚是发动机压气机、燃烧室、涡轮等部件最主要的防护措施之一。

对发动机几何与材料模型进行修改时,将压气机机匣、涡轮机匣、燃烧室机匣和加力燃烧室壳体的厚度增加 3 mm,易损性模型其余参数和计算过程保持不变,易损性仿真软件计算得到的整机杀伤概率 $P_{k/h}$ 如图 9 所示。

分析图 9 可知,机匣加厚可以使发动机在各个攻击方向上的 B 级杀伤概率都有所降低。整机 B 级杀伤概率平均值相对下降 25.39%,部分方向上的 B 级杀伤概率的相对下降幅度达 50% 以上(如:方向 15 和方向 25)。

发动机易损性的缩减,还可以从整体的角度,使用部件遮挡的方法进行。部件遮挡一般是通过

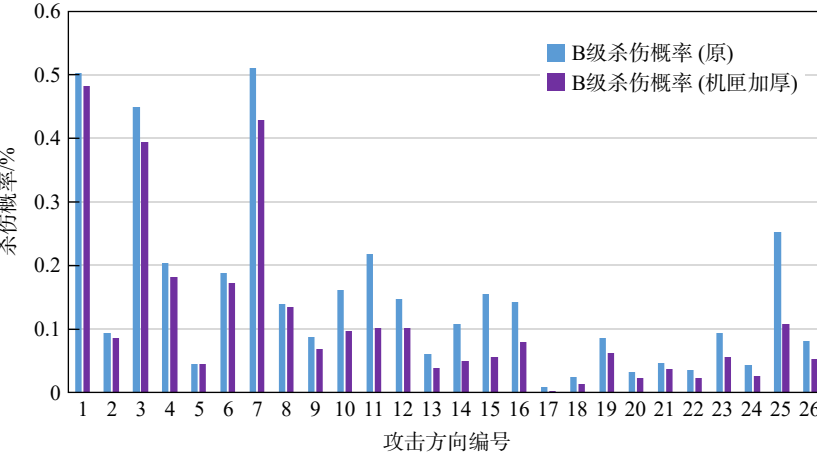


图 9 机匣加厚对 B 级杀伤概率的影响

Fig. 9 Effect of casing thickening on class B kill probability

使用涂层或板材以抵抗或吸收威胁能量来实现的^[15-18],在进行发动机易损性仿真计算时,可以通过增加发动机附近的机身蒙皮厚度来模拟使用装甲遮挡发动机这一措施。

对发动机几何与材料模型进行修改,增加发动机附近蒙皮厚度 3 mm,其余模型参数和计算过

程保持不变,使用易损性仿真软件计算得到的全机杀伤概率如图 10 所示。加厚蒙皮可以使发动机在部分攻击方向上的 B 级杀伤概率有所降低,整机 B 级杀伤概率平均值相对下降了 5.86%,部分方向上的 B 级杀伤概率的相对下降幅度达 20% 以上(如:方向 9 和方向 13)。

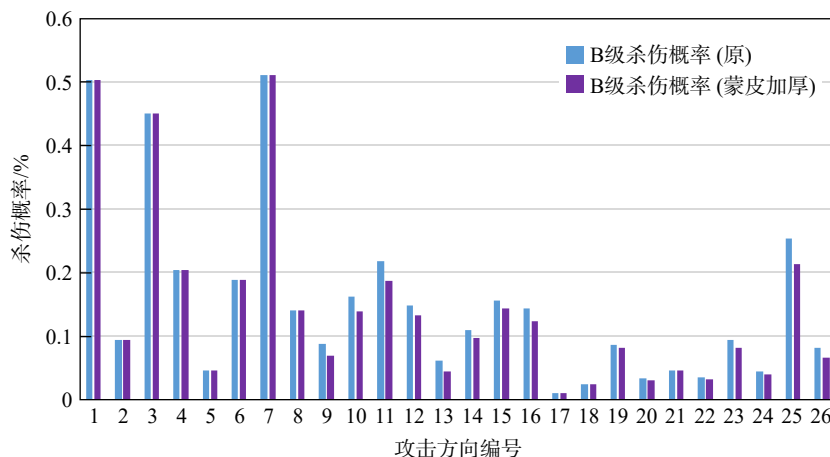


图 10 蒙皮加厚对 B 级杀伤概率的影响

Fig. 10 Effect of skin thickening on class B kill probability

5 结 论

为提高飞机的作战生存力,本文提出了一种航空发动机易损性评估的计算仿真方法,并利用某型航空发动机遭遇弹丸威胁的仿真验证了方法的可行性。主要结论如下:

1) 根据发动机杀伤机理,识别发动机致命性部件,并按照一定的数学模型,对发动机与弹丸等威胁的遭遇交会进行模拟,开发出发动机易损性仿真分析软件,具备了发动机易损性指标量化计算能力。根据仿真计算结果,方向 1 和方向 7,压气机机匣、低压转子、高压转子以及燃油控制装置的 B 级杀伤概率较高。

2) 根据发动机易损性缩减评估结果,采取改进措施可以有效改善发动机生存力:机匣加厚可以使 B 级杀伤概率平均值相对下降 25.39%;飞机蒙皮加厚可以使 B 级杀伤概率平均值相对下降 5.86%,个别方向上杀伤概率相对下降幅度可达 20% 以上。因此,提出的改进建议在发动机防护和生存力设计中具有很好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] ROBERT E B. 飞机作战生存力分析与设计基础[M] 林光宇, 宋笔锋, 译. 北京: 航空工业出版社, 1998.
ROBERT E B. The fundamentals of aircraft combat survivability

analysis and design[M]. Translated by LIN Guangyu, SONG Bifeng. Beijing: Aviation industry press, 1998. (in Chinese)

- [2] DAVID H H, RONALD M D, MICHAEL S R. Unmanned aerial system survivability[R]. AIAA 2009-2401, 2009.
- [3] THOMAS L W. New model to evaluate weapon effects and platform vulnerability[J]. WSTIAC Newsletter, 2001, 2(4): 1-3.
- [4] 李金瑞, 李天, 王永庆. 军用飞机生存力研究中的易损性分析[J]. 飞机设计, 2001, 21(2): 1-7.
LI Jinrui, LI Tian, WANG Yongqing. The vulnerability analysis in aircraft survivability research[J]. Aircraft Design, 2001, 21(2): 1-7. (in Chinese)
- [5] 杨哲, 李曙林, 李寿安, 等. 导弹破片威胁下的飞机易损性分析[J]. 电光与控制, 2012, 19(12): 38-42.
YANG Zhe, LI Shulin, LI Shouan, et al. Analysis of aircraft vulnerability to the fragments of a missile[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(12): 38-42. (in Chinese)
- [6] 卢军民, 李向东, 毛东方. 破片式战斗部作用下固定翼飞机的易损性评估[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008, 32(6): 695-700.
LU Junmin, LI Xiangdong, MAO Dongfang. Fixed wing aircraft vulnerability assessment under fragmentation warhead[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 32(6): 695-700. (in Chinese)
- [7] 裴扬, 宋笔锋, 石帅. 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. Analysis method of aircraft combat survivability: Progress and challenge[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 216-234. (in Chinese)
- [8] 裴扬, 宋笔锋, 李占科. 飞机易损性评估的基本方法研究[J]. 火箭与制导学报, 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)
- [9] BALL R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. 2nd ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [10] 刘彤. 防空战斗部杀伤威力评估方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- LIU Tong. The lethality assessment method of air-defense missile warhead[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [11] 裴扬, 宋笔锋, 韩庆. 考虑跳弹现象的飞机单击中易损性计算方法[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(3): 347-352.
- PEI Yang, SONG Bifeng, HAN Qing. A new method for calculating aircraft single-hit vulnerability considering threat ricochet[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(3): 347-352. (in Chinese)
- [12] 韩庆. 飞机易损性评估方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1999.
- HAN Qing. Research on aircraft vulnerability assessment method [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999. (in Chinese)
- [13] 裴扬. 飞机非核武器威胁下易损性定量计算方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- PEI Yang. Quantitative calculation methods of aircraft non-nuclear vulnerability[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [14] 高玉伟, 韩庆, 裴扬. 某型无人机的易损性评估和减缩设计[J]. 航空计算技术, 2007, 37(3): 44-47.
- GAO Yuwei, HAN Qing, PEI Yang. Vulnerability assessment and vulnerability reduction design of an UAV[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(3): 44-47. (in Chinese)
- [15] 夏庆军, 张安. 电视遥控制导导弹的作战效能评估[J]. 电光与控制, 2006, 13(3): 46-48, 53.
- XIA Qingjun, ZHANG An. Operation effectiveness evaluation of television guided missiles[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(3): 46-48, 53. (in Chinese)
- [16] 李炜, 范宁军, 王正杰. EFP 定向战斗部导弹系统毁伤概率分析[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 60-63.
- LI Wei, FAN Ningjun, WANG Zhengjie. Analysis on damage probability of EFP warhead missile system[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 60-63. (in Chinese)
- [17] 李向东, 魏惠之, 张运法. 小口径动能弹丸对飞机的毁伤计算模型[J]. 南京理工大学学报, 1996, 20(3): 241-244.
- LI Xiangdong, WEI Huizhi, ZHANG Yunfa. Computational model for the damage of the small caliber kinetic energy projectile to the helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1996, 20(3): 241-244. (in Chinese)
- [18] 吴宗一, 方洋旺, 文莹, 等. 干扰条件下基于二次效应的导弹毁伤能力研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 101-104.
- WU Zongyi, FANG Yangwang, WEN Ying, et al. A study on missile damage effectiveness based on quadratic effect in jamming[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1): 101-104. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)