

文章编号: 1674-8190(2025)01-133-06

军用飞机气动完整性研究

张登成, 何宇廷, 李哲, 张腾, 张艳华
(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 飞行器气动完整性可以综合地表征飞行器在服役(作战)使用过程中的气动质量特性, 但针对军用飞机, 目前仍未有可以综合表征其气动质量特性的指标。为此, 首次提出军用飞机气动完整性的概念: 军用飞机在作战使用过程中, 气动外形能够保持完好, 飞行性能、飞行品质及飞行控制满足并能保持规定要求的属性。介绍气动完整性概念的提出过程及其定义, 讨论气动完整性的基本内涵和基本特性, 阐明军用飞机气动完整性是飞机作战效能发挥的基础; 介绍飞行器气动完整性的表征方法, 分析军用飞机气动完整性的主要影响因素。本文引入军用飞机气动完整性这一新概念, 可为我国军用飞机设计、制造、试验和保障的发展提供参考。

关键词: 军用飞机; 气动完整性; 作战完整性; 概念; 内涵; 表征

中图分类号: V271.4; V211.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.01.16

Research on aerodynamic integrity of military aircraft

ZHANG Dengcheng, HE Yuting, LI Zhe, ZHANG Teng, ZHANG Yanhua
(Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The aerodynamic integrity of aircraft can comprehensively characterize the aerodynamic mass characteristics of aircraft during service (combat) use. However, there is currently no index that can comprehensively characterize the aerodynamic mass characteristics of aircraft. Therefore, the concept of aerodynamic integrity of military aircraft is first proposed and studied: during the operational use of military aircraft, the aerodynamic shape can be maintained intact, and the flight performance, quality, and control can meet and maintain the required attributes. The process and definition of the concept of aerodynamic integrity are introduced, and the basic connotation and basic characteristics are discussed. It is believed that the aerodynamic integrity of military aircraft is the basis of the combat effectiveness of aircraft. The characterization method of aircraft aerodynamic integrity is introduced, and the main influencing factors of military aircraft aerodynamic integrity are analyzed. The new concept of aerodynamic integrity of military aircraft is introduced aims to provide reference for the development of military aircraft design, manufacturing, testing and support in China.

Key words: military aircraft; aerodynamic integrity; operation integrity; concept; connotation; characterization

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-11-30

通信作者: 张登成(1969-), 男, 博士, 教授。E-mail: dengcheng_zhang@163.com

引用格式: 张登成, 何宇廷, 李哲, 等. 军用飞机气动完整性研究[J]. 航空工程进展, 2025, 16(1): 133-138.

ZHANG Dengcheng, HE Yuting, LI Zhe, et al. Research on aerodynamic integrity of military aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 133-138. (in Chinese)

0 引言

军用飞机只有在功能状态完好的情况下才能充分发挥其作战效能,作战使用条件下装备的完好状态可以用作战完整性来表征^[1]。

完整性一词最早出现在美国空军提出的结构完整性概念中,并在其后逐步形成和发展了飞机结构完整性大纲,作为军用飞机论证、设计、使用的纲领性文件之一^[2]。

随着人们认识的不断深入,完整性的概念也在不断发展,其内涵得到不断的丰富和完善。在飞机结构完整性的基础上,逐步衍生并发展出了发动机结构完整性、机械及其子系统完整性、推进系统完整性、电子设备及系统完整性、武器系统完整性、自主保障完整性和低可探测完整性等完整性概念^[3-6]。

针对飞机气动部件缺失、损坏,飞机非对称破坏,机翼穿孔、操纵面故障对飞机气动特性和飞行品质的影响等,国内外开展了大量研究^[7-26],但这些研究都没有提出气动完整性的概念并使用此概念来描述飞机的这些变化的气动特性。

面向军用飞机的作战使用需求,何宇廷等^[6]提出了军用飞机作战完整性的概念,从作战任务流程的角度提出作战完整性的综合要求,并指出:“飞行器服役(作战)完整性包括飞行器在服役(作战)使用过程中的气动完整性、平台完整性和电磁完整性”。然而,上述论述主要是从飞机作战完整性总体概念组成的角度初步提出了气动完整性概念,尚未专门深入开展关于军用飞机气动完整性的研究。本文则从气动完整性的具体概念、内涵、表征、影响因素等方面入手,围绕军用飞机的气动完整性进行专门的、较为深入的探讨分析,以期为后续研究打下基础。

1 军用飞机气动完整性的提出

飞机结构和系统如果出现完整性的缺失,则有可能导致飞机气动特性的改变^[27]。例如,飞机外部机体结构发生变形或者损坏,必然导致飞机机身和翼面气动特性的改变,进而影响飞机的飞行性能和飞行品质,造成飞机飞行性能下降、飞行

品质恶化;飞机上与舵面运动相关的机械或者电气系统发生故障,有可能导致气动舵面不能有效发挥其应有的飞行控制作用,同样会造成飞机飞行性能下降、飞行品质恶化……可见,飞机结构和系统完整性的下降,可能会造成飞机的飞行性能下降和飞行品质恶化,从而可以引申为对飞机气动特性方面综合特性的影响,这个影响是由于飞机结构或系统的完整性变化所导致的,因而气动的不完整也是飞机的固有属性,飞机的这种与气动特性相关的固有属性可以用气动完整性来表述^[28]。

飞机结构或系统的完整性改变会导致气动完整性的改变,但也存在一些情况,在飞机结构和系统完整性保持完好的条件下气动完整性发生衰减^[29]。例如,随着飞机服役时间的增加,飞机表面涂层的光洁度变差,或舱盖的密封性变差,对飞机结构而言,结构依然保持了功能完好的状态,但是飞机的气动性能却变差了,气动完整性发生了衰减。

2 军用飞机气动完整性的基本概念

军用飞机气动完整性首先是关于飞机气动布局的完整性,气动布局是否完整、气动特性是否有质的改变与作战完整性都有着强关联性;其次,飞机的气动特性会随着时间的推移而发生衰减,当量变积累到一定程度,就会造成飞机性能衰减和飞行品质下降,进而影响飞机作战使用,也可以认为飞机气动特性完整性缺失,进而影响飞机的作战完整性。

可见,飞机气动的“完整”与否,不仅关乎飞机飞行性能的高低、飞行品质的优劣,更是“以小见大”地影响着作战飞机作战完整性的完整度,进而影响作战飞机的作战适应性和作战效能的发挥。因此气动完整性是包含于作战完整性之内的子概念,气动完整性是从气动外形布局、操纵舵面设计、性能品质衰减等方面体现作战完整性的飞机飞行动力学表征。

因此,可以初步给出军用飞机气动完整性的定义:军用飞机在作战使用过程中,气动外形能够保持完好,飞行性能、飞行品质及飞行控制满足并

能保持规定要求的属性。

与作战完整性的概念类似,气动完整性也有动态和静态之分,气动完整性的静态属性反映了军用飞机的状态,动态属性则反映了军用飞机的能力。例如,静稳定性反映的是飞机是否保持稳定的状态,动稳定性则反映的是飞机受到扰动后恢复稳定状态的能力^[30]。因此,还可以给出气动完整性的另外两种定义:①飞机在作战使用过程中,气动外特性、飞行性能、飞行品质及飞行控制未削弱的状态;②飞机在作战使用过程中,在要求的升阻特性、稳定性、操纵性、敏捷性、飞行品质、气动弹性等水平下,保持气动性能完好及功能未受到削弱的能力。其中,第一种表述可以看作是飞机静态气动完整性的概念,而第二种表述可以看作是飞机动态气动完整性的概念。也可以这样理解军用飞机气动完整性的静态和动态属性:静态属性可以理解为军用飞机气动外形保持完整的初始状态;而动态属性可以理解为气动完整性遭受破坏后,采取主动或者被动的各种措施,恢复气动完整性的过程。

3 军用飞机气动完整性的内涵

3.1 气动完整性的研究范畴

飞机气动完整性的表现形式为气动外形的完整,进而表现为飞行性能和飞行品质优良,而飞行控制的作用则是来提高飞机的飞行性能,改善飞机的飞行品质,其逻辑关系如图 1 所示。

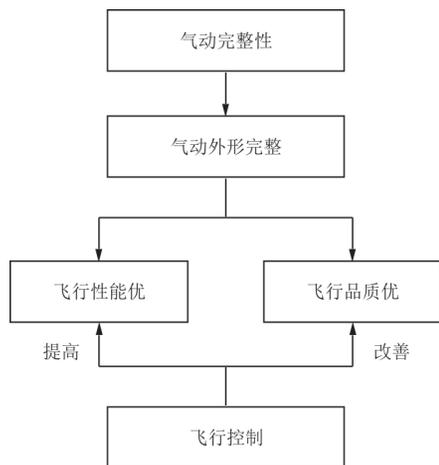


图 1 气动完整性的表现形式

Fig. 1 Expression of aerodynamic integrity

在传统的飞机设计方法中,控制系统的作用只限于改善已确定飞机的操纵稳定特性。而随着军用飞机高机动性、敏捷性、稳定性、安全性需求日益突出,控制系统设计的地位逐渐提升,即在飞机总体设计阶段,就将飞行控制系统和气动布局、机体结构、动力装置等进行协调设计,称为主动控制技术或随控布局技术,用以提高飞机飞行性能、改善飞行品质。采用主动控制技术,可按照控制系统的作用,综合选择飞机最佳结构外形、降低飞机阻力,减轻飞机结构重量,以获得布局合理、性能先进的随控布局飞机。

在军用飞机的气动完整性内涵中,飞行控制在气动完整性的动态属性中发挥重要作用,如飞机个别舵面损伤或者卡滞后,通过飞行控制系统的控制律重构或者控制舵面的重新分配,及时弥补飞机因气动完整性受损导致的飞行性能下降或飞行品质降级,达到尽量恢复军用飞机气动完整性的目的。

因此,气动完整性需要综合考虑飞机气动特性、飞行性能、飞行品质和飞行控制,从作战使用角度出发,任何一方面特性变差,都将导致飞机不能安全有效地完成相应任务,即导致气动完整性变差,需要综合权衡分析。

3.2 气动完整性的基本特性

“飞机的作战完整性是通过设计赋予、通过制造实现、在作战使用中维持或者增长的飞机固有的基本属性”^[31]。作为飞机作战完整性的子概念,气动完整性也必然具有上述属性。这个属性使得飞机气动完整性也具有客观性、相对性、随机性和可控性的基本特征。飞机气动完整性的客观性是指其为飞机本身客观存在的一种固有本质属性,可以通过飞机的设计确定和制造获得,可以通过某些方法手段去度量;飞机气动完整性的相对性是指其是针对飞机承担的作训任务和使用环境而言的,离开了对应的作训任务和使用环境则没有现实意义;飞机气动完整性的随机性指的是由于飞机各种属性和质量特性、作训任务和使用环境的随机性而使其也具有随机特性,可以使用概

率统计的理论和方法来描述分析飞机的气动完整性;飞机气动完整性的可控性是指其可以在使用过程中通过一定的措施进行控制,使其在飞机的作训过程中得到维持甚至增长,如飞机飞行性能的恢复甚至提高,飞行品质的改善等。

4 军用飞机气动完整性表征

飞机的气动完整性可以用气动完整度 I_a 来表征度量。军用飞机的气动完整度可以定义为,在规定的条件下、规定的时间内、规定的环境中,执行规定任务时,飞机可以保持气动外形完好及飞行性能、飞行品质未衰退和下降的概率。

飞机气动完整度 I_a 的表征首先可以用气动外形完整度 I_{as} 来表达。飞机由于气动部件缺失或者变形造成的不完整程度可以用气动外形非完整度 W_{as} 来表征,则飞机气动完整度则可以表示为

$$I_{as} = 1 - W_{as} \quad (1)$$

其次,飞机气动完整度 I_a 的表征也可以用飞机飞行性能保持度 R_p 和飞行品质保持度 R_q 来综合表征。随着飞机服役时间的增加,飞机的飞行性能会衰退,飞行品质会下降。飞机飞行性能的衰退程度 W_p 可以用飞机当前的各项飞行性能与设计/服役之初的飞行性能之比来综合表示;飞机飞行品质的下降程度 W_q 可以用飞机当前的各项飞行品质与设计/服役之初的飞行品质之比来综合表示。则飞机飞行性能保持度 R_p 表示为

$$R_p = 1 - W_p \quad (2)$$

飞行品质保持度 R_q 表示为

$$R_q = 1 - W_q \quad (3)$$

因此,飞机气动完整度则可以简单表示为

$$I_a = R_p \times R_q \quad (4)$$

5 军用飞机气动完整性的影响因素

飞机的气动完整性同作战完整性一样,也是通过设计赋予、通过制造实现的,因而军用飞机的气动完整性就取决于飞机的设计与制造。本文所研究的气动完整性影响因素主要关注军用飞机在作战使用中使其得以维持或者增长的影响因素。

军用飞机气动完整性是对飞机在作战使用过程中,其气动外形能够保持完好,进而使得飞行性能、飞行品质、飞行控制满足并能保持规定要求的基本属性。因此,可从影响或制约其气动外形的角度分析其主要影响因素。

从气动外形角度看,其主要影响因素可分为两个方面,一方面是随服役时间增加而缓慢变化的相关因素,如口盖、舱门等封严性下降、结构缓慢变形、翼面光洁度下降、发动机性能降低、舵面响应变差等,该方面影响因素变化缓慢,且逐步导致飞行性能和飞行品质降低,当其累积到一定程度将显著影响气动完整性,进而影响飞机的作战完整性。

另一方面是飞机遭受外部作用或主动加改装等导致的结构外形瞬间变化,如武器打击、遭遇冰雹、结冰、鸟撞、破损、缺失、修复、改装等,将显著改变飞机的气动完整性,从而显著影响作战完整性。

6 结束语

1) 本文给出了军用飞机气动完整性的定义:军用飞机在作战使用过程中,气动外形能够保持完好,飞行性能、飞行品质及飞行控制满足并能保持规定要求的属性。

2) 军用飞机气动完整性的基本内涵应当包括气动特性、飞行性能、飞行品质和飞行控制以及它们的综合影响。气动完整性应当具有客观性、相对性、随机性和可控性的基本特性。

3) 提出气动完整性的表征参数——气动完整度,分别从气动部件变形或缺失程度和飞行性能、飞行品质衰退两个角度给出了气动完整度的表示方法。

4) 分析了军用飞机气动完整性的主要影响因素,一方面是随服役时间增加的缓变因素,如结构形变、发动机性能下降等;另一方面是突变因素,如结构作战损伤、飞机加改装等。

军用飞机气动完整性是一个新的概念,属于飞机作战完整性的一个方面,能够更综合地反映

飞机作战过程中的气动质量特性,它的引入将为军用飞机的设计理念、制造技术、验证方法以及全寿命的维修保障等带来新的创新点。但是,该领域的研究工作还处在初探阶段,需要更多的科技人员开展更加深入而广泛的研究。

参 考 文 献

- [1] 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 Shulin, CHANG Fei, HE Yuting, et al. Survivability analysis and evaluation of military aircraft in operational use [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构完整性大纲: GJB 775A—2012[S]. 北京:中国人民解放军总装备部, 2012.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Military aircraft structural integrity program: GJB 775A—2012[S]. Beijing: General Armaments Department of the People's Liberation Army, 2012. (in Chinese)
- [3] USA Department of Defense. Weapon system integrity program: MIL-HDBK-515 [S]. USA: Department of Defense, 2013.
- [4] USA Department of Defense. Propulsion system integrity program: MIL-STD-3024 [S]. USA: Department of Defense, 2008.
- [5] USA Department of Defense. Mechanical equipment and subsystems integrity program: MIL-STD-1798C [S]. USA: Department of Defense, 2013.
- [6] 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.
HE Yuting, ZHANG Teng, MA Binlin. Basic connotation and evaluation of military aircraft structural operational integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 1-7. (in Chinese)
- [7] HAYES C. Effects of simulated wing damage on the aerodynamic characteristics of a swept-wing airplane model [R]. Hampton, VA, United States: NASA Langley Research Center, 1968.
- [8] BETZINA M D, BROWN D H. Aerodynamic characteristics of an A-4B aircraft with simulated and actual gunfire damage to one wing [R]. USA: NASA AMES Research Center, 1976.
- [9] SPEARMAN M L. Wind-tunnel studies of the effects of simulated damage on the aerodynamic characteristics of airplanes and missiles [R]. Hampton, VA, United States: NASA Langley Research Center, 1982.
- [10] IRWIN A J. Investigation into the aerodynamic effects of simulated battle damage to a wing [D]. Loughborough, East Midlands, UK: Loughborough University, 1999.
- [11] MUJAHID S S. Aerodynamics of battle damaged finite aspect ratio wings [D]. Loughborough, East Midlands, UK: Loughborough University, 2005.
- [12] RENDER P, PICKHAVER T. The influence of hole orientation on the aerodynamics of battle damaged wings [C] // 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference. New Orleans, Louisiana: AIAA, 2012: 2890-2898.
- [13] GUO T H, LITT J. Resilient propulsion control research for the NASA integrated resilient aircraft control (IRAC) project [C] // AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit. Rohnert Park, California: AIAA, 2007: 2802-2814.
- [14] NGUYEN N, KRISHNAKUMAR K, KANESHIGE J, et al. Dynamics and adaptive control for stability recovery of damaged asymmetric aircraft [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Keystone, Colorado: AIAA, 2006: 6049-6059.
- [15] BACON B, GREGORY I. General equations of motion for a damaged asymmetric aircraft [C] // AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina: AIAA, 2007: 6306-6315.
- [16] SHAH G. Aerodynamic effects and modeling of damage to transport aircraft [C] // AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2008: 6203-6214.
- [17] SHAH G, HILL M. Flight dynamics modeling and simulation of a damaged transport aircraft [C] // AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Minneapolis, Minnesota: AIAA, 2012: 4632-4649.
- [18] DING M L, ZENG C, BINIENDA W K. Assessment on aerodynamic degradation for wing-damaged transport aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2020, 92(7): 973-979.
- [19] KRZYSIAK A. Wind tunnel tests of damage to the Tu-154M aircraft wing [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(6): 1-16.
- [20] PEI Y, CHEN Z W, WEI Y H, et al. Method for assessing combat survivability for aircraft with wing damage [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2017, 231(5): 877-886.
- [21] 高玉伟,韩庆,张锋,等. 作战飞机翼面损伤对其气动特性的影响研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(5): 394-397.

- GAO Yuwei, HAN Qing, ZHANG Feng, et al. Influence of combat aircraft's wing surface damaged on longitudinal aerodynamic characteristics[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(5): 394-397. (in Chinese)
- [22] 张锋, 韩庆, 刘星. 战损飞机纵向气动特性分析[J]. 航空计算技术, 2013, 43(2): 48-50, 55.
- ZHANG Feng, HAN Qing, LIU Xing. Study on longitudinal aerodynamic performance of fighting damaged aircraft [J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(2): 48-50, 55. (in Chinese)
- [23] YANG R G, YU J Q, SHEN Y C. Flight dynamic characteristic analysis of a generic airbreathing hypersonic vehicle [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 716/717: 724-729.
- [24] SHEN Y C, YU J Q, LUO G C, et al. Robust gain-scheduling controller for airbreathing hypersonic flight vehicle [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 716/717: 1624-1630.
- [25] 贾忠湖, 王刚, 柳文林. 基于 CFD 的机翼损伤飞机再平衡问题研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(3): 19-22.
- JIA Zhonghu, WANG Gang, LIU Wenlin. Study on rebalance of wing damaged aircraft based on CFD[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(3): 19-22. (in Chinese)
- [26] 柳文林, 刘琦, 潘子双. 战斗机平尾翼面损伤对全机气动特性的影响分析[J]. 飞行力学, 2022, 40(5): 9-13, 21.
- LIU Wenlin, LIU Qi, PAN Zishuang. Influence on aircraft aerodynamic characteristics of damaged fighter plane horizontal tail [J]. Flight Dynamics, 2022, 40(5): 9-13, 21. (in Chinese)
- [27] USA Department of Defense. Aircraft structural integrity program (ASIP): MIL-STD-1530D [S]. USA: Department of Defense, 2016.
- [28] 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, 31.
- HE Yuting. A study of equipment operational integrity [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 1-8, 31. (in Chinese)
- [29] HE Yuting. On aircraft operational integrity[C]// 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Hangzhou: CSAA, 2021: 1-8.
- [30] 何宇廷. 飞行器健康状态的表征方法研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 1-8.
- HE Yuting. Study on characterization method of aircraft health status [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 1-8. (in Chinese)
- [31] 何宇廷. 飞行器服役(作战)完整性的提出与发展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 1-11.
- HE Yuting. Presentation and development of aircraft operational integrity [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 1-11. (in Chinese)

(编辑:马文静)