

文章编号:1674-8190(2021)05-096-06

民用飞机铰链运动机构维修间隔制定研究

冯蕴雯¹, 张家乐¹, 薛小锋¹, 路成¹, 冯成慧²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

摘要: 铰链机构是民用飞机中一种被广泛采用的运动机构,其维修间隔的合理制定对于保障飞机安全、经济运营起到重要作用。通过对MSG-3、适航条款和国家军用标准中相关内容以及维修间隔的影响因素进行详细分析,提出民用飞机铰链机构维修间隔的制定流程,并以某型飞机襟翼铰链机构维修间隔制定为例进行验证。结果表明:本文提出的制定流程可行,为飞机铰链机构的维修间隔和维修大纲的合理制定提供了依据;该铰链机构的偶然损伤和环境损伤的检查门槛值、重复检查间隔均为5个日历年,疲劳损伤的检查门槛值为24 000 fh,重复检查间隔为14 400 fh。

关键词: 维修间隔;铰链运动机构;预定维修大纲制订文件;重要结构项目;影响因素

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Maintenance Interval Development of Hinge Mechanism of Civil Aircraft

FENG Yunwen¹, ZHANG Jiale¹, XUE Xiaofeng¹, LU Cheng¹, FENG Chenghui²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Department of Structure Design, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Hinge mechanism as a widely used motion mechanism in civil aircraft, the reasonable formulation of its maintenance interval plays an important role in ensuring the safe and economic operation of aircraft. By analyzing the MSG-3, China Civil Aviation Administration and Military Standard of China, and the influencing factors of maintenance interval, the formulation process of the maintenance interval of the hinge mechanism of civil aircraft is proposed. The maintenance interval formulation of flap hinge mechanism of an aircraft is taken as an example to verify the process. The results show that the proposed process in this paper is feasible, which can provide the basis for the reasonable formulation of maintenance interval and maintenance program of aircraft hinge mechanism. The inspection threshold and repeated inspection interval of accidental damage and environmental damage of the hinge mechanism are 5 calendar years, the inspection threshold of fatigue damage is 24 000 fh and the repeated inspection interval is 14 400 fh.

Key words: maintenance interval; hinge mechanism; scheduled maintenance development document; significant structural item; influence factor

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(51875465)

通信作者: 薛小锋, xuexiaofeng@nwpu.edu.cn

引用格式: 冯蕴雯, 张家乐, 薛小锋, 等. 民用飞机铰链运动机构维修间隔制定研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 96-101.

FENG Yunwen, ZHANG Jiale, XUE Xiaofeng, et al. Research on maintenance interval development of hinge mechanism of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 96-101. (in Chinese)

0 引言

铰链是一种用来连接两个结构并允许两者之间做相对转动的机械装置,被广泛应用于增升装置、舱门等重要机构^[1]。通常情况下,铰链连接处传递载荷大,应力高且复杂,易破坏,对飞机安全产生较大影响。如B-2716飞机因运动机构故障使得襟翼未放出导致飞机无法起飞冲出跑道坠毁的重大事故^[2],而通过合理的维修可有效避免该故障的发生,因此为确保铰链式运动机构在飞机运营阶段持续性正常工作,合理维修间隔的制定十分重要。

预定维修大纲制订文件MSG-3是目前国内外通用的制定维修大纲的指导性文件^[3],国内外研究者基于该文件针对民用飞机部件维修间隔的确定方法做了大量的研究。其中两大飞机制造商空客和波音拥有较为成熟的结构维修间隔分析方法和流程。波音在B787结构维修大纲的制定过程中,提出了一套以MSG-3为指导确定维修间隔的方法,通过收集、统计和分析相似机型、相似结构维修任务的数据,再根据一定的分析计算确定结构的维修间隔^[4]。空客则根据MSG-3中的规定、供应商提供的维修间隔建议和工作小组的工作经验,当三者一致时才确定出结构的维修间隔^[5]。J. Block等^[6]以可靠性为中心的维修理论为指导,依据大量的飞机飞行数据对预防性维修间隔的合理性进行了评估;S. Porotsky等^[7]比较了基于可靠性分布和结构寿命分布的两种预防性维修间隔制定方法的不同,并提出了一种独特通用的维修间隔制定策略;吴昊^[8]基于粗糙集理论对结构维修间隔制定过程中考虑因素的权重进行了合理分配,并通过民用飞机结构件实例的分析验证了方法的可行性;李耀华等^[9]通过考虑不同利用率对民用飞机金属结构件环境损伤影响的敏感性,提出了结构件维修间隔与利用率的匹配模型,确定了不同利用率下结构的维修间隔,并以飞机中央盒段的上壁板内表面结构为例验证了模型的有效性;李景奎等^[10-11]将部件可靠性与经济性相结合,建立了维修间隔优化模型,求解得到部件最优维修间隔,在保证部件可靠性的同时提高了利用率、减少了维

修成本;刘涛等^[12]根据部件的寿命分布形式,通过三参数威布尔极大似然估计法确定出系统部件的维修间隔。纵观国内外研究现状可以看出,部件维修间隔的确定离不开已有机型的经验数据,这也是目前国内所欠缺的,且国内关于维修间隔的研究也大多是从方法层面入手,缺乏较为完善的民用飞机部件维修间隔确定流程。

本文针对民用飞机铰链式运动机构,基于适航条款、国军标和MSG-3相关内容,提出一套较为完善的铰链机构维修间隔制定流程,并以某型飞机后缘襟翼增升装置机构的下沉铰链运动机构为例,对维修间隔的确定进行详细分析。

1 规范分析

1.1 MSG-3

运营人/制造厂家预定维修大纲制定文件ATA MSG-3是民用飞机维修大纲制定的指导性文件,包括系统和动力装置分析程序、飞机结构分析程序、区域分析大纲以及闪电/高强度辐射场分析程序^[3]。根据MSG-3飞机结构分析程序,在进行结构维修间隔的制定过程中主要包括以下4个步骤。

(1) 确定飞机结构项目。结构维修分析适用于所有的飞机结构,因此根据结构件失效或故障后对飞机的安全性造成的后果,将结构划分为重要结构项目(Structural Significant Item,简称SSI)和其他结构项目。重要结构的失效将影响整个结构机构的正常使用,甚至危及飞机安全。其余结构则为其他结构项目。进一步根据设计理念又将SSI项目分为损伤容限项目和安全寿命项目。

(2) 对确定的重要结构项目进行偶然损伤(Accidental Damage,简称AD)和环境损伤(Environmental Deterioration,简称ED)分析,根据SSI项目的位置、边界、故障分析等对比评定确定检查要求。并通过分析对损伤来源的分析确定AD、ED的检查门槛值和重复检查间隔的确定要求。

(3) 安全寿命项目所确定的安全寿命期限应与适航限制部分相符合。

(4) 损伤容限项目的疲劳损伤(Fatigue Da-

mage,简称FD)检查在门槛值之后进行,其检查间隔依照损伤容限评定结果制定,并根据结构的损伤形式选择目视或者无损检测的检测方式。

1.2 适航条款

运输类飞机适航标准CCAR25.571结构的损伤容限和疲劳评定的总体要求为:对结构强度、设计和制造的疲劳评定结果必须保证在飞机的整个使用寿命期间,该结构不会由于疲劳、腐蚀、制造缺陷或意外损伤而引起灾难性破坏^[13]。条款明确了结构使用的载荷谱、环境等要求,并对评定的目的、依据、内容和设计准则给出了说明。

对于按照损伤容限设计的结构必须按照条款(b)进行损伤容限评定和(e)要求的离散源评定^[13],主要包括以下3方面内容。

(1) 损伤容限评定必须包括确定因疲劳、腐蚀或意外损伤引起的预期损伤部位和型式。

(2) 剩余强度评定结果必须表明,结构能够承受规章规定的载荷情况。

(3) 损伤后的结构必须能够承受飞行中可合理预期出现的静载荷。

1.3 国家军用标准

军用飞机结构强度规范:第6部分重复载荷、耐久性和损伤容限(GJB 67.6A)中3.2.4对结构的初始缺陷假设和检查方式给出了具体的说明^[14]。对于缓慢裂纹扩展和破损安全主要元件的孔和缺口处,如果结构厚度小于等于1.27 mm,需假设1.27 mm长的穿透厚度初始缺陷。对于厚度大于1.27 mm的结构,则假设1.27 mm半径的圆角初始缺陷。且对于缓慢裂纹扩展结构,在飞机上无法通过目视进行检查,破损安全结构在主要传力元件破坏后可以由目视检测到损伤。且其在不修理的情况下,最小的使用周期应为重复检查间隔的2倍。

2 铰链机构维修间隔制定分析

铰链式运动机构是飞机两个区域之间的重要连接形式,且该机构承受的载荷一般很大且复杂,例如增升装置机构中下沉式铰链运动机构,如图1

所示。

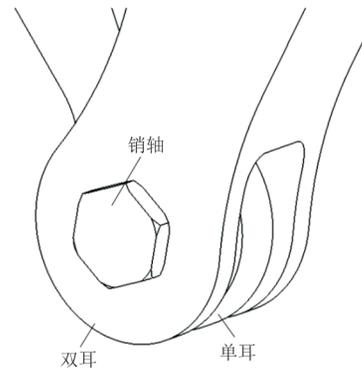


图1 铰链机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hinge mechanism

为保证铰链机构在飞机的使用寿命期内考虑经济性的同时保持原有的功能,合理的预定维修工作的制定十分重要。铰链运动机构中销轴、轴承和耳片接头是铰链机构承载和传载的重要组成部分,其故障将影响整个机构正常功能的实现,甚至危及飞机安全,因此将这些结构划分为重要结构项目(SSSI),并分别对它们进行AD、ED、FD或安全寿命分析。

2.1 结构维修间隔制定

偶然损伤是指因为一些随即发生的离散事件,导致飞机结构固有的剩余强度水平降低,对于铰链机构来说,在飞机运营过程中由于天气原因,如雨天雨水的侵蚀,冰雹等因素造成的损伤。另外在结构的制造、运输、装配或维修过程中,人为因素也会造成结构的偶然损伤。偶然损伤在飞机的整个运营过程中是随机发生的,其重复检查间隔一般根据制造厂商和运营商对类似飞机结构的经验来制定,一般会选择与预定维修检查间隔对应的单级或多级检查作为重复检查间隔,且首次检查时间和重复检查间隔时间相等。

环境损伤一般是飞机运营过程中由于不良的天气或者工作环境引起的结构强度发生变化,例如雨天雨水的腐蚀、结构的应力腐蚀、不同材料之间的异电位腐蚀等。对于铰链运动机构而言,环境损伤一般会随着使用时间的延长逐渐恶化,例如结构件表面防护漆层的脱落、破损安全耳片接头的异电位腐蚀等。环境损伤检查门槛值和检查

间隔的制定一般根据运营商和制造厂商对类似结构件的使用、维修经验进行确定。

疲劳损伤是一个与使用时间有关的累积过程,它是由结构初始裂纹在交变载荷作用下引起开裂并持续扩展造成的,疲劳损伤检修间隔和检查方式一般根据损伤容限评定来确定。根据适航条款 CCAR25.571 和国家军用标准 GJB 67.6A,当结构以假设初始缺陷扩展的方式进行损伤容限分析时,检查门槛值是指裂纹从初始到结构断裂经历的飞行循环数,并且考虑分散系数。重复检查间隔是指裂纹从可检测到结构断裂经历的飞行循环数,并且考虑分散系数。根据 GJB 67.6A 单路传力结构分散系数取3,对于其他类结构取2,如果受载是变化且复杂的还应考虑环境系数。

2.2 机构维修间隔制定

机构维修间隔主要以制造厂商的试验数据、技术分析、类似部件的使用经验等为依据,通过对比分析选择合适的维修间隔,避免维修工作不足或过量对机构的安全性和可靠性产生不利影响。

铰链机构的维修间隔应以 SSI 项目的故障发现为基础,通过损伤容限评定明确结构在使用过程中的潜在故障,且制定的工作间隔要小于发现潜在故障到功能故障发生的时间,并留有足够余量便于采取措施避免、消除故障。除此之外还应考虑销轴消耗件的使用频率、消耗件的库存、运行环境及气候等。

常用的维修间隔一般由日历时间、飞行小时、飞行循环数或字母检来表示,铰链运动机构一般采用飞行循环数或字母检来表述维修间隔。铰链运动机构维修间隔制定流程如图2所示。首先根据类似飞机机构经验对 SSI 项目进行金属结构的 AD 和 ED 分析,并将结果列入结构维修大纲中。然后判断 SSI 结构是否是损伤容限项目,轴承一般为按照安全寿命思想设计的标准件结构,因此在进行维修大纲制定过程中没有疲劳相关的检查工作,但确定的安全寿命期限应在 CCAR25.1529^[13] 适航限制中进行说明。耳片和销轴均为损伤容限

结构,通过损伤容限分析得到各个结构的检查间隔,对于单路传力耳片结构一般无法通过目视检查看到损伤,多路传力耳片结构在主传力路径破坏后可以采用目视检查。销轴由于耳片遮蔽导致损伤不易发现,在设计过程中一般采用较耳片强而硬的材料提高检查间隔,并进行合适的表面处理来提高耐磨性,且一般作为消耗件使用。

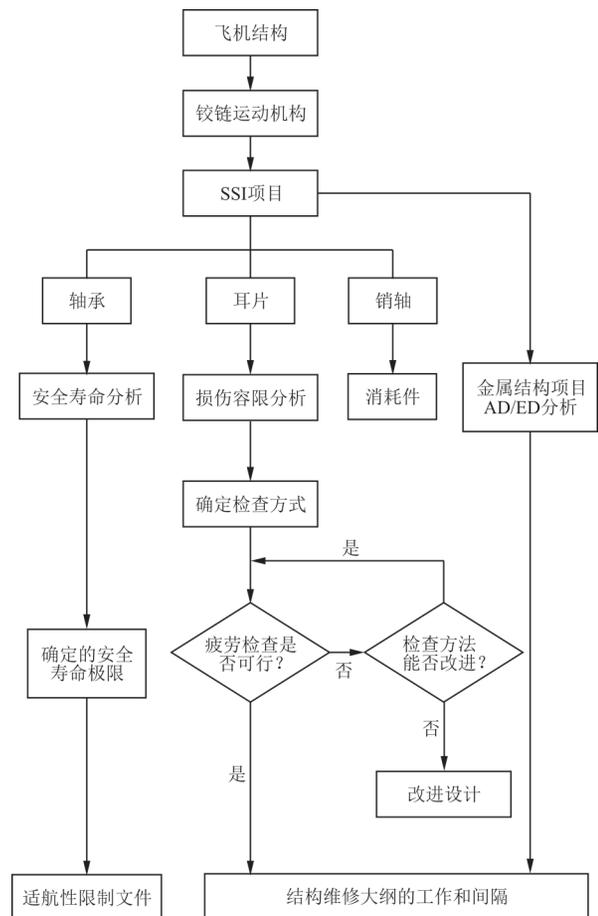


图2 铰链机构结构维修间隔制定流程

Fig. 2 Establish process of hinge mechanism structure maintenance interval

3 铰链机构维修间隔制定案例分析

以某型民用飞机后缘襟翼增升装置机构中下沉式铰链收放运动机构为例,对该铰链机构维修间隔的制定进行说明。该铰链机构由单路传力的单耳、双耳、销轴和自润滑关节轴承组成,耳片和销轴按照假设初始缺陷扩展方式的损伤容限分析,结果如表1所示。

表 1 耳片和销轴损伤容限分析结果
Table 1 Damage tolerance analysis results of lugs and pin

结构	材料	剩余强度/MPa	剩余强度许用值/MPa	临界裂纹长度/mm	检查门槛值/fh	重复检查间隔/fh
单耳	钛合金	77.54	296.29	9.98	4 209 620	20 346
双耳	铝合金	30.44	145.70	11.88	3 309 721	17 824
销轴	钢	237.00	237.00	7.78	75 468	34 266

已知该机型的服役期寿命为 60 000 fh, 1A 检查间隔为 600 fh, 1C 检查间隔为 4 800 fh。从表 1 可以看出: 耳片和销轴的检查门槛值均大于飞机的服役期寿命, 但重复检查间隔较小, 因此应制定强制疲劳维修任务, 并将轴承(安全寿命件)的到期更换期限列入适航限制项目^[15], 轴承的更换期一般应小于服役期寿命的一半, 同时根据 1C 的检查间隔和维修经济性, 铰链机构的 FD 检查门槛值应定为 5C 即 24 000 fh。

根据表 1 损伤容限分析结果, 双耳的重复检查间隔小于单耳和销轴, 因此根据双耳重复检查间隔 17 824 fh, 铰链机构的 FD 重复检查间隔应定为 3C 即 14 400 fh。

根据类似增压装置铰链机构的使用经验, AD 和 ED 检查门槛值和检查间隔一般定为 5 个日历年, 该机型后缘襟翼铰链机构维修间隔如表 2 所示。

表 2 后缘襟翼铰链机构维修间隔
Table 2 Maintenance interval of trailing edge flap hinge mechanism

损伤类别	检查门槛值	重复检查间隔
AD	5 个日历年	5 个日历年
ED	5 个日历年	5 个日历年
FD	5 个 C 检	3 个 C 检

从表 2 可以看出: 偶然损伤和环境损伤的检查门槛值、重复检查间隔均为 5 个日历年, 疲劳损伤的检查门槛值为 5 个 C 检(24 000 fh), 重复检查间隔为 3 个 C 检(14 400 fh)。

4 结 论

(1) 本文提出了铰链机构维修间隔的制定流程, 以襟翼下沉铰链机构为例证明该流程是可行的, 可以为飞机维修大纲的制定提供支持。

(2) 机构偶然损伤和环境损伤的检查门槛值、重复检查间隔均为 5 个日历年, 疲劳损伤的检查门槛值为 24 000 fh, 重复检查间隔为 14 400 fh。

参 考 文 献

- [1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册: 第 9 册——载荷、强度和刚度[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 428-428.
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol. 9—load, strength and stiffness[M]. Bei jing: Aviation Industry Press, 2002: 428-429. (in Chinese)
- [2] 冯军. 民机襟缝翼运动机构可靠性设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015: 26-40.
FENG Jun. Reliability design of flap slat motion mechanism of civil aircraft[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015: 26-40. (in Chinese)
- [3] Air Transport Association of America. Operator/manufacturer scheduled maintenance development: MSG-3 [S]. US: Air Transport Association of America, 2009.
- [4] Boeing Company. B-787 scheduled maintenance requirements development policy and procedures handbook (PPH) [R]. Chicago: Boeing Company, 2006.
- [5] Airbus Company. A380 scheduled maintenance requirement development policy and procedures handbook (PPH) [S]. Toulouse: Airbus Company, 2006.
- [6] BLOCK J, SODERHOLM P, TYRBERG T. Evaluation of preventive maintenance task intervals using field data from a complete life cycle [C] // 2008 IEEE Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-7.
- [7] POROTSKY S, BLUVBAND Z, LIN Y. Replacement interval optimization for aircraft maintenance [C] // 2005 IEEE Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 1-5.
- [8] 吴昊. 基于粗糙集的案例推理在民机结构 MSG-3 分析中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 403-409.
WU Hao. Civil aircraft MSG-3 analysis based on rough set and case based reasoning [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 403-409. (in

- Chinese)
- [9] 李耀华, 张海峰. 综合利用率评估的民机结构维修间隔确定方法[J]. 工程设计学报, 2019, 26(6): 627-634.
LI Yaohua, ZHANG Haifeng. Method for determining maintenance interval of civil aircraft structure combined with assessment of utilization ratio[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(6): 627-634. (in Chinese)
- [10] 李景奎, 蒯瑞管, 段飞飞, 等. 考虑可靠度和可用度的民机维修间隔优化研究[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 282-285.
LI Jingkui, LIN Ruiguan, DUAN Feifei, et al. Research on optimization of civil aircraft maintenance interval considering reliability and availability[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(1): 282-285. (in Chinese)
- [11] 李景奎, 蒯瑞管, 段飞飞, 等. 民机系统部件维修间隔优化[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 90-94.
LI Jingkui, LIN Ruiguan, DUAN Feifei, et al. Optimization of maintenance intervals for civil aircraft system components [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(1): 90-94. (in Chinese)
- [12] 刘涛, 苏茂根. 民机系统部件维修间隔的确定方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(3): 139-144.
LIU Tao, SU Maogen. Research on the method of determining the maintenance interval of civil aircraft system parts [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(3): 139-144. (in Chinese)
- [13] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards of transport category aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [14] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构强度规范第6部分: 重复载荷、耐久性和损伤容限: GJB 67.6A—2008[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008.
The General Reserve Department of PLA. Military airplane structural strength specification part 6: repeated loads, durability and damage tolerance; GJB 67.6A—2008[S]. Beijing: The General Reserve Department of PLA, 2008. (in Chinese)
- [15] 施剑伟. 民机结构适航限制项目制定方法探讨[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(4): 17-23.
SHI Jianwei. Study of airworthiness limitation items establishment for commercial aircraft structures[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016(4): 17-23. (in Chinese)

作者简介:

冯蕴雯(1968—),女,博士,教授。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程、系统工程。

张家乐(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器可靠性维修性工程、结构设计。

薛小锋(1983—),男,博士,副研究员。主要研究方向:疲劳寿命可靠性及维修性。

路成(1989—),男,博士。主要研究方向:可靠性分析、维修性工程。

冯成慧(1982—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合结构设计。

(编辑:丛艳娟)