

民用飞机油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击适航验证技术研究

孔令勇, 陆佳南, 吴志斌

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 目的 依据适航条款 CCAR25.963-e-1 的要求, 对民用飞机油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击能力的适航符合性进行研究。方法 根据适航验证工作需要, 制定了飞机油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击的适航符合性验证流程, 明确了适航取证需要考虑的油箱口盖范围和撞击角度, 建立了发动机碎片有限元模型, 开展了油箱口盖抗发动机碎片冲击的仿真分析与试验室试验。结果 仿真结果与试验结果对比分析后, 二者基本一致, 仿真分析基本能预测试验结果。结论 该仿真分析方法可供飞机口盖抗碎片冲击设计使用, 该油箱口盖抗低能量碎片冲击适航符合性验证流程可供相似飞机适航取证参考使用。

关键词: 碎片冲击; 油箱口盖; 发动机碎片; 适航验证

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.030

中图分类号: O344

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)09-0173-07

Airworthiness Certification Technology on Civil Aircraft Fuel Tank Cover Withstanding the Engine Debris

KONG Ling-yong, LU Jia-nan, WU Zhi-bin

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

ABSTRACT: The work aims to study the performance of civil aircraft fuel tank cover on withstanding the engine debris according to the requirement of airworthiness standards CCAR25.963-e-1. The airworthiness certification process of fuel tank cover withstanding engine debris was developed according to the airworthiness certification requirements. The impact area and angles of fuel tank cover for airworthiness certification were defined. The finite element model of engine debris was established. The simulation analysis and laboratory test were carried out to the capability of the fuel tank cover on withstanding engine debris. After analyzed comparatively, the simulation results and test results were approximately consistent and the simulation analysis could basically predict the test results. The simulation method can be used to design the fuel tank cover withstanding debris. The airworthiness certification process of fuel tank cover withstanding debris can be referred for similar aircraft airworthiness certification.

KEY WORDS: debris impact; fuel tank cover; engine debris; airworthiness certification

虽然航空涡轮发动机和 APU 制造商努力降低转子非包容性损坏的概率, 但服役经验表明非包容性压

气机和涡轮转子的破坏仍然存在^[1-2]。涡轮发动机故障导致高速运动的转子碎片穿透附近的结构、油箱口

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-07-22

Received: 2020-07-21; Revised: 2020-07-22

作者简介: 孔令勇(1981—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为飞机结构鸟撞、碎片冲击。

Biography: KONG Ling-yong(1981—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: bird strike, debris impact of aircraft structure.

盖、机翼下壁板、机身、系统设备、管路、EWIS 线缆和其他安装在飞机上的动力装置^[3-9]。关于 APU，尽管到目前发生的转子非包容性故障仅对飞机造成轻微的影响，但转子破坏所产生的碎片仍需引起关注^[10]。既然转子的非包容性失效不可能完全消除，CCAR25 部要求对飞机设计必须采取预防措施，最大程度降低此类事件带来的伤害^[1]。因此，民用飞机油箱口盖设计必须考虑低能量发动机碎片冲击影响。

CCAR25.963-e-1 条款要求，运输类飞机油箱口盖必须能承受住低能量发动机碎片、轮胎碎片或其他可能的碎片的冲击以防止燃油的流失量达到危险程度。适航规章对油箱口盖抗外来物碎片冲击仅规定了一个原则性的要求，即冲击后防止燃油的流失量达到的危险程度，而对碎片的形状尺寸、质量、撞击速度和撞击角度均没有说明。这是影响民用飞机抗碎片冲击适航取证的一个技术难题，亟需解决。

本文对油箱口盖抗低能量发动机碎片进行了研究，而轮胎碎片及其他可能的碎片的冲击另单独研究。首先研究了碎片冲击的规章、咨询通告、相似飞机设计资料、论文以及国内外技术专家交流报告，制定了碎片符合性验证思路、碎片模型及碎片影响范围；随后开展了碎片冲击仿真初步分析和试验对比研究，提出了油箱口盖双层防护的抗碎片冲击设计思想，以及各层的设计要点，供相似飞机设计参考使用。

1 条款研究

本文对 CCAR25、FAR25、CS25 及相关的咨询通告^[11-15]进行了研究，找到相同点和不同点，给出了差异对比分析，同时给出了油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击的适航符合性验证思路。

1.1 CCAR25 部

CCAR25 部对油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击的要求条款为 25.963-e-1，涉及的相关内容摘取如下：“油箱口盖必须满足下述准则，以防止燃油的流失量达到危险程度”，“位于经验或分析表明很可能遭受撞击的区域内的所有口盖，必须通过分析或试验表明，其遭受轮胎碎片、低能量发动机碎片或其它可能的碎片打穿或造成变形的程度已降至最低”。

该条款对油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击仅给出了一个原则性要求，即油箱口盖遭受低能量发动机碎片冲击后需防止燃油的流失量达到危险程度。关于低能量发动机碎片的质量、速度、几何形状、材料、冲击角度、冲击姿态、影响口盖范围及结构合格判据的量化指标均没有给出，这给具体型号飞机的适航取证工作带来困难。

1.2 FAR25 部

FAR25 对油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击的要求与 CCAR25 部内容是一致的，但是它以咨询通告 AC25.963-1、AC20-128A 对条款内容进行了解释^[11-12]。咨询通告中规定了低能量发动机碎片的影响范围：口盖位于发动机或风扇前 15° 范围内，从旋转中心测量。测量旋转中心时，从最后面涡轮发动机的 15° 范围内，如图 1 所示。

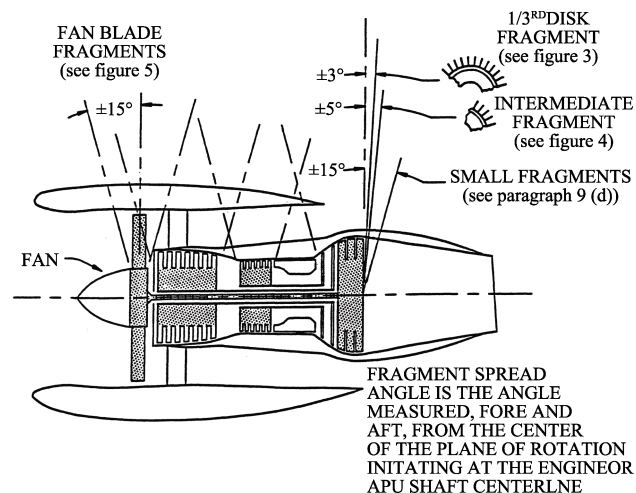


图 1 FAR 相关文件规定碎片抛射范围
Fig.1 Debris spreading area stipulated by FAR files

1.3 CS25 部

CS25-AMC25.963 中规定了碎片冲击的影响范围，如图 2 所示。碎片的类型、尺寸、速度、撞击角度等。同时给出了油箱口盖量化的合格判据：燃油不允许连续流出 (running leak) 或滴漏 (dripping leak)；允许渗漏，但 15 min 内渗漏打湿壁板外表面的尺度小于 15.2 cm。

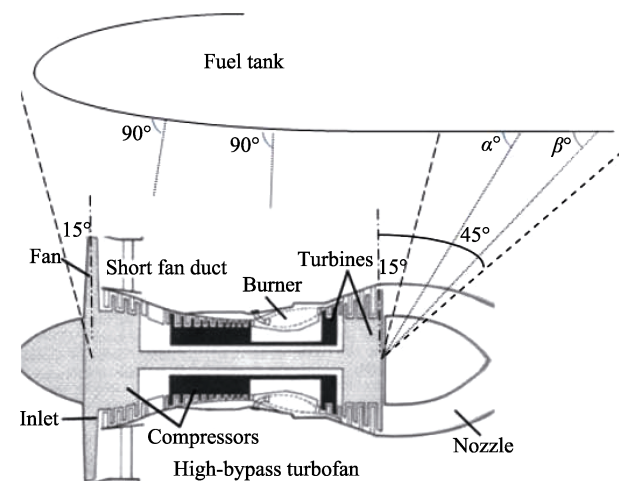


图 2 CS 相关文件规定碎片抛射范围
Fig.2 Debris spreading area stipulated by CS files

1.4 规章对比分析

CCAR25、FAR25 和 CS25 部及对应的咨询通告对碎片冲击的对比分析见表 1。

表 1 CCAR25, FAR25 和 CS25 条款对比分析
Tab.1 Comparative analysis of CCAR25, FAR25 and CS25

适航规章	条款解读	工程可执行度
CCAR25	仅规定了定性的要求，防止燃油的流失常量达到危险程度，对碎片模型及影响范围没有规定	不好
FAR25	通过 AC25.963-1 和 AC20-128 规定了低能量发动机碎片为小碎片，并且规定了碎片的影响范围，为±15°扫略范围。对碎片模型无量化指标	不好
CS25	在 AMC25.963 中规定了碎片的模型、冲击速度以及影响范围为±15°和-15°至-45°，同时给出了结构合格的量化指标，即“燃油不允许连续流出（running leak）或滴漏（dripping leak）；允许渗漏，但 15 min 内渗漏打湿壁板外表面的尺度小于 15.2 cm”，工程可操作性好	好

2 适航符合性验证流程

油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击适航符合性验证工作是一项复杂的系统工程，涉及冲击动力学专

业、结构设计专业、总体布置专业、四性专业和动力装置等多个专业，各专业之间相互影响，因此制定合适的适航验证思路是完成该项内容的关键^[16-18]。参考 CCAR25、FAR25、CS25 及咨询通告，依据发动机各级转子特性和机翼油箱口盖布置情况^[19-20]，制定如下适航验证思路（流程见图 3）。

- 1) 首先根据发动机各级转子布置情况，建立低能量发动机碎片沿发动机转轴的站位模型；
- 2) 根据低能量发动机碎片站位模型建立碎片±15°影响范围的锥体模型；
- 3) 将低能量发动机碎片±15°影响范围锥体模型与机翼油箱口盖结构数模耦合，确定影响口盖数量，此时碎片撞击角度为 90°；
- 4) 根据发动机碎片站位模型建立碎片-15°至-45°影响范围的锥体模型；
- 5) 将低能量发动机碎片-15°至-45°影响范围锥体模型与机翼油箱口盖模型耦合，确定影响口盖数量，此时碎片撞击角度为碎片初始位置与油箱口盖的真实夹角；
- 6) 参考 CS25-AMC25.963 建立碎片等效模型，制定碎片冲击边界条件和油箱口盖适航符合性合格判据；
- 7) 针对不同范围内（±15°、-15°至-45°）的油箱口盖开展不同角度的碎片冲击动力学仿真计算；
- 8) 根据仿真计算结果制定适航符合性验证试验矩阵，开展适航验证试验，同时验证冲击动力学分析方法；

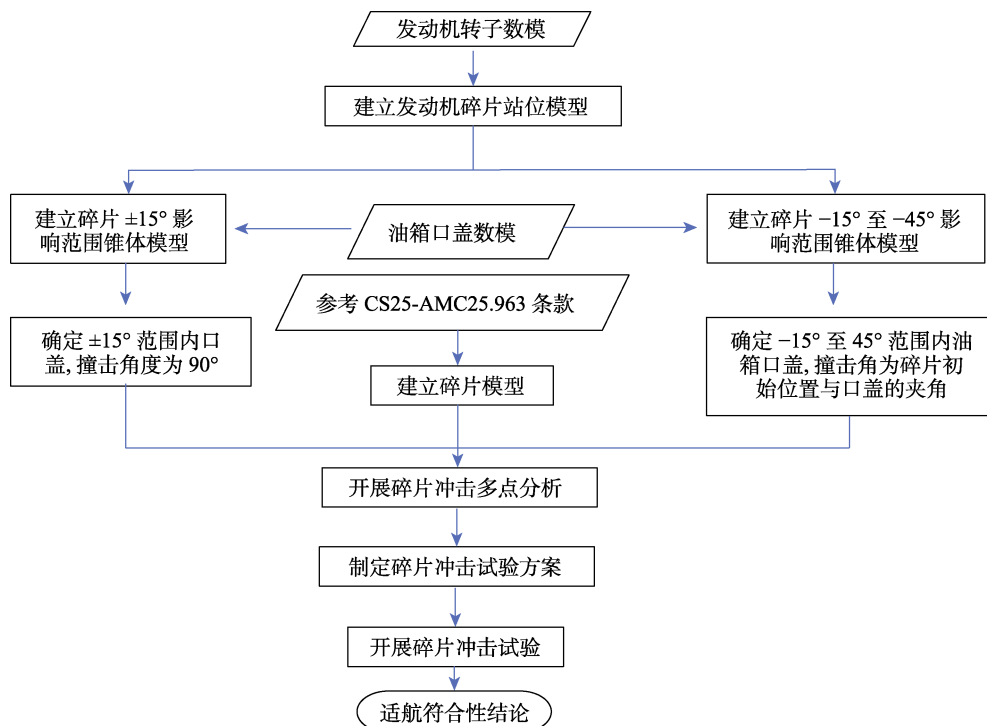


图 3 碎片冲击适航验证流程
Fig.3 Airworthiness certification flow of debris impact

9) 油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击适航符合性结论。

3 碎片冲击分析与试验

3.1 碎片模型

参考文件 CS25-AMC25.963^[15]和发动机供应商提供的碎片资料,本文低能量发动机碎片模型采用边长为 9.5 mm 的立方体模拟,材料选用高强度钢。有限元建模时,相对于机体薄壁采用 shell 单元模型,碎片模型需采用 solid 单元模拟,如图 4 所示。



图 4 低能量发动机碎片有限元模型
Fig.4 Finite element model for engine debris

3.2 口盖有限元模型及计算分析

油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击仿真分析采用大型商用动力学分析软件 PAM-CRASH 进行。油箱口盖通常为薄壁结构,有限元建模时通常采用 shell 单元模拟,单元特征尺寸 2~3 mm (单元尺寸一般需要试验验证),模型如图 5 所示。

油箱口盖抗碎片冲击仿真计算工况需考虑撞击

角度,各种典型位置,同一位置还需要考虑碎片的各种撞击姿态(边、面和角)。图 6 是一种边撞击的典型计算结果,油箱口盖发生破损。

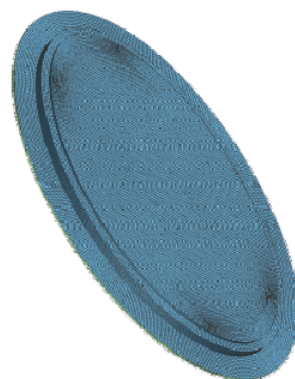


图 5 油箱口盖有限元模型
Fig.5 FE model for fuel tank cover

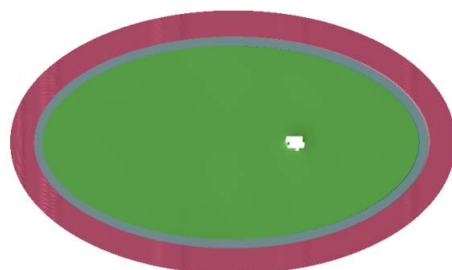


图 6 油箱口盖碎片冲击有限元计算结果
Fig.6 FEM calculation result of fuel tank cover withstanding debris

3.3 油箱口盖碎片冲击试验

油箱口盖抗发动机碎片冲击试验原理如图 7 所示。试验系统主要由发生系统、激光测速系统、高速摄像系统、信号采集处理系统组成。碎片速度由气罐压力大小来控制,试验前需将碎片目标速度与压力大小进行标定。

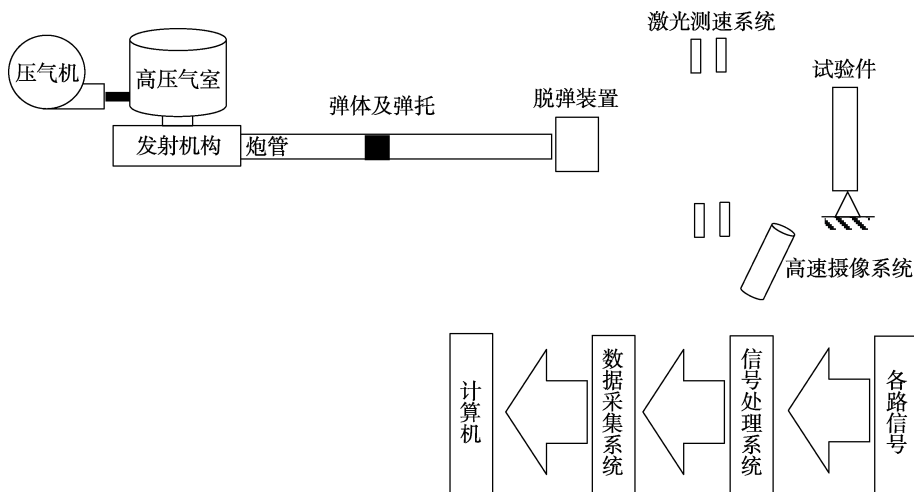


图 7 碎片冲击试验系统原理
Fig.7 Sketch of debris impact test system

油箱口盖碎片冲击试验矩阵规划需要考虑油箱口盖典型位置、碎片冲击姿态（边、面和角，见图 8）以及重复性（一般取 3 次）三方面因素。图 9 为开展的油箱口盖的碎片冲击试验 7 个撞击点说明，图 10 为 7 次试验的结果，表 2 为 7 次试验的统计情况。

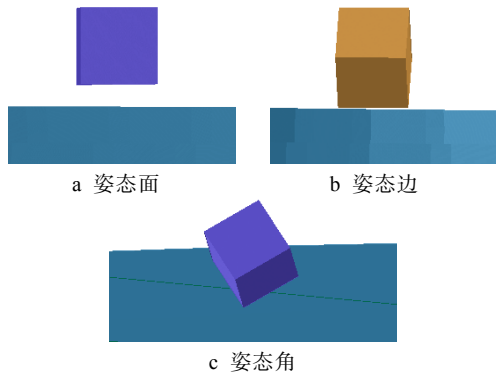


图 8 碎片冲击姿态示意

Fig.8 Debris impact attitude: a) attitude surface; b) attitude side; c) attitude angle

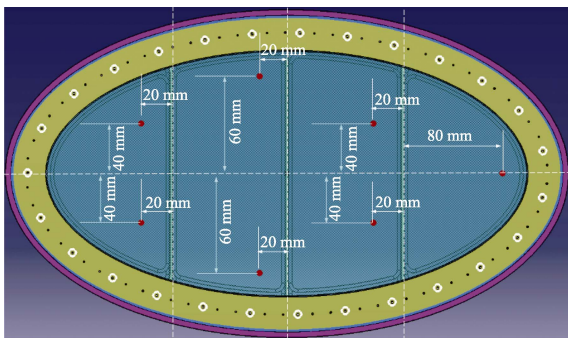


图 9 低能量发动机碎片冲击位置说明
Fig.9 Impact location for engine debris

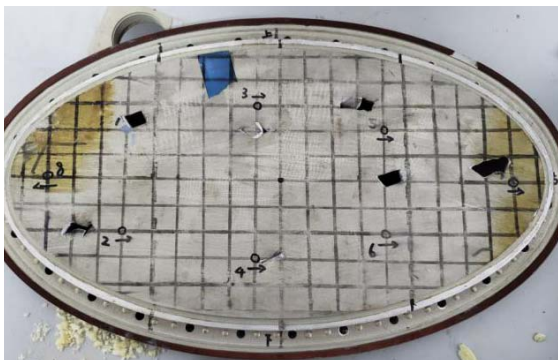


图 10 低能量发动机碎片冲击试验结果
Fig.10 Engine debris impact test result

7 次试验中，IC1、IC5、IC6 和 IC7 均为边撞击，结构损伤相似，破损大小稍有差异，试验分散性相对较小。IC2、IC3 和 IC4 均为角撞击，结构损伤有较大差异，IC2 损伤为明显的孔洞破损，而 IC3 和 IC4 损伤为轻微的裂痕，试验分散性相对稍大。同

时将不同的撞击姿态对比发现，边撞击比角撞击略微严酷。

表 2 油箱口盖碎片冲击试验结果

Tab.2 Debris impact test result for fuel tank cover		
工况	碎片撞击姿态	口盖损伤/mm
IC1	边撞击	15×18 的孔洞
IC2	角撞击	30×25 的孔洞
IC3	角撞击	30×25 的裂痕
IC4	角撞击	20×20 的裂痕
IC5	边撞击	40×30 的孔洞
IC6	边撞击	30×25 的孔洞
IC7	边撞击	40×25 的孔洞

3.4 仿真计算与试验对比

3.2 小节的仿真计算工况与 3.3 小节的典型试验工况 IC1、IC5、IC6 和 IC7 是一致的，仿真和试验均表明口盖外表面会产生破损，不能满足 25.963-e-1 的要求，仿真分析基本能预测试验结果，能够指导结构设计。需要说明的是仿真结果具有唯一性，试验结果具有分散性，仿真结果无法体现 IC1、IC5、IC6 和 IC7 试验结果中结构损伤的细微差别。仿真分析对适航符合性验证仅提供支持，无法充分验证。充分的验证需通过重复性试验获取。

3.5 设计更改及仿真计算

根据 3.2 小节中的仿真结果和 3.3 小节中的试验结果可知，该油箱口盖遭受碎片冲击时破损，不满足 CCAR25.963-e-1 规定的防止燃油流失量达到危险程度的要求，需进行更改完善。通过研究计算结果和试验结果，发现口盖表面产生不同程度的破损，而条款对口盖提出了密封性要求，单纯增加口盖厚度会带来较大的质量代价，因此想到了双层设计的更改思路，即在原有口盖的内侧增加一层铝板。应用第 3.4 小节中与试验结果对比过的分析模型进行了结构更改仿真评估，计算结果如图 11 所示。由图 11 可知，口盖外表面发生破损，内侧铝板发生塑性变形，没有单元删除，满足设计要求。

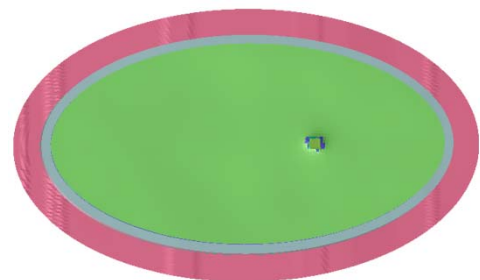


图 11 油箱口盖更改后碎片冲击有限元计算结果
Fig.11 FEM calculation result of fuel tank cover withstanding debris impact after redesign

4 结论

1) 该仿真分析方法基本能预测试验结果, 可指导油箱口盖抗冲击设计。

2) 油箱口盖通常为薄壁结构, 单层结构通常很难满足抗低能量碎片冲击防燃油泄漏要求(如果满足需要较高的质量代价), 建议采用双层的设计思想。外层采用抗冲击为主设计, 内层采用防燃油泄漏为主设计。

3) 碎片冲击试验结构损伤具有一定的分散性, 而仿真分析具有唯一性, 仿真不能充分验证结构适航符合性, 建议采用试验为主、仿真分析支持的验证方法。

本文对油箱口盖抗低能量发动机碎片进行了初步研究, 后续可开展以下研究:

1) 由于碎片模型为立方体, 其在飞行过程中由于无翼型且非回转体, 稳定性较差, 冲击瞬间姿态(边、面、角)不易控制, 建议开展姿态稳定性研究;

2) 油箱口盖只是油箱的一小部分, 从飞机整体安全性考虑, 还需开展油箱壁板的符合性验证工作。

参考文献:

- [1] 陈志达. 民航客机发动机转子非包容性损坏分析[J]. 航空制造技术, 2011(13): 75-79.
CHEN Zhi-da. Analysis of Uncontained Engine Rotor Events for Civil Airplane[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(13): 75-79.
- [2] 李雪姣, 付仁合. 航空发动机非包容性碎片的危害评估方法研究[J]. 装备制造技术, 2011(2): 21-23.
LI Xue-jiao, FU Ren-he. The Research on the Assessment of Uncontained Debris Hazard[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(2): 21-23.
- [3] 孙纓军, 陈志雄, 张林帅, 等. 商用飞机发动机非包容转子碎片对燃油系统影响的风险分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28(11): 74-78.
SUN Ying-jun, CHEN Zhi-xiong, ZHANG Lin-shuai, et al. The Risk Assessment of the Effect of Uncontained Engine Rotor Fragments on Fuel System of Commercial Aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(11): 74-78.
- [4] 张绪, 郭晓宁. 民用飞机 APU 非包容转子碎片对机体结构损伤分析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(9): 19-22.
ZHANG Xu, GUO Xiao-ning. Analysis of Commercial Airframe Structure Damage from Uncontained APU Rotor Fragments[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(8): 19-22.
- [5] 李鹏昌, 刘岩东, 吕明, 等. EWIS 设计中的 PRA 分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31(5): 23-28.
LI Peng-chang, LIU Yan-dong, LYU Ming, et al. PRA in EWIS Design[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2014, 31(5): 23-28.
- [6] 李东明, 孙有朝, 李龙彪. 民用飞机机翼油箱超压损坏事件风险评估[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 636-640.
LI Dong-ming, SUN You-chao, LI Long-biao. Study on Risk Assessment of Overpressure Damage Event of Airplane Air Fuel Tank[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(4): 636-640.
- [7] 张健. 航空发动机叶片碎片对增压舱安全防护的适航要求分析[J]. 科技资讯, 2017, 15(3): 86-87.
ZHANG Jian. Analysis of Aircraft Engine Blade in Airworthiness Requirements of the Pressure Cabin Safety Protection[J]. Science & Technology Information, 2017, 15(3): 86-87.
- [8] 李信良, 夏鹤鸣, 汤振宇. 民用飞机机翼液压管路的布置研究[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(5): 68-70.
LI Xin-liang, XIA He-ming, TANG Zhen-yu. Research on the Layout of Hydraulic Tubing in Civil Aircraft Wing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(5): 68-70.
- [9] 白杰, 付仁合, 王伟. 非包容性失效条件下飞机蒙皮厚度的算法[J]. 工程设计学报, 2010, 17(6): 444-448.
BAI Jie, FU Ren-he, WANG Wei. The Algorithm of Aircraft Skin Thickness Considering Uncontained Debris[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(6): 444-448.
- [10] 何周理, 何林锋, 李萍. APU 转子爆破对防火墙影响的研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(1): 14-16.
HE Zhou-li, HE Lin-feng, LI Ping. Study on the Effect of APU Rotor Bursting on the Firewall[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016(1): 14-16.
- [11] AC20-128A, Design Consideration for Minimizing Hazards Caused by Uncontained Turbine Engine and Auxiliary Power Unit Rotor Failure[S].
- [12] AC25.963-1, Fuel Tank Access Covers[S].
- [13] CCAR-25-R4, 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准[S].
CCAR-25-R4, Civil Aviation Regulation of China Part 25: Airworthiness Standard Of Transport Category Airplane[S].
- [14] FAR25, Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes[S].
- [15] CS-25-17, Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes[S].
- [16] 杨万里. 转子爆破对飞机机体结构危害的风险量化方法研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 29-33.
YANG Wan-li. Risk Quantification Method for Airframe Damage Due to Rotor Burst[J]. Aeroengine, 2012, 38(3): 29-33.
- [17] 王伟, 吴延松, 陈希远, 等. 基于某型飞机的航空发动机非包容转子碎片风险计算[J]. 装备制造技术, 2014(4):

- 30-32.
WANG Wei, WU Yan-song, CHEN Xi-yuan, et al. The Risk Analysis of Uncontained Engine Rotor Fragments of One Aircraft[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(4): 30-32.
- [18] 曾强. 飞机非包容转子失效安全性分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
ZENG Qiang. Research on Safety Analysis Methods of Aircraft in the Case of Uncontained Turbine Engine Rotor Failure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [19] 艾玲英. 发动机转子爆破碎片碰撞角度计算方法的研究[J]. 科技信息, 2011(22): 785-786.
AI Ling-ying. Research on Calculation Method of Impact Angle of Engine Rotor Blasting Debris[J]. Science & Technology Information, 2011(22): 785-786.
- [20] 陆入成, 李先哲, 李洋, 等. 飞机设计中发动机转子碎片非包容性设计[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 351-363.
LU Ru-cheng, LI Xian-zhe, LI Yang, et al. Design of Uncontained Engine Rotor Fragments Failure During Airplane Design[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 351-363.