DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2017.11.074

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

孙缨军[1]，陈志雄[2,*]，张林帅[2]，蔡景[3]

1. 民航上海航空器适航审定中心，上海 200335

2. 上海工程技术大学 汽车工程学院，上海 201620

3. 南京航空航天大学 民航学院，江苏 南京 211106

摘 要：飞机燃油系统作为飞机重要的系统之一，其安全性至关重要。存在与发动机有关的非包容转子爆破的潜在灾难性失效模式，必须在飞机设计阶段尽早地对其进行解决。基于功能危害树分析方法，通过研究适航管理文件，得出行之有效的风险分析流程。对某型商用飞机进行了非包容转子爆破风险算例分析，确定受影响的系统及对应的失效影响等级，给出可接受的保护措施。结果表明本风险分析流程符合适航规章要求，为其他型号飞机的相关设计工作提供借鉴。

关键词：商用飞机；燃油系统；转子爆破；非包容性；风险分析

中图分类号：V228.1，V231.96　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-5453（2017）11-0074-05

发动机非包容转子爆破是商用飞机风险事件中的一种特定风险，此风险发生过程中会对飞机飞行安全以及机组和乘客安全产生较大的威胁，在极端情况下，甚至会导致灾难性的后果[1]。2010 年 11 月 4 日，澳航航空的空中客车 A380 在前往澳大利亚的途中，发动机发生爆炸，碎片击中飞机，对飞机系统和结构造成重大损害，并导致左翼燃油箱燃油泄漏。因此，美国联邦航空局（FAA）以及中国民用航空局均发布了相关的规章制度和相应的设计规范，在设计阶段对非包容转子进行充分的安全性设计考虑，要求务必通过设计阶段的预防措施尽最大可能降低转子失效对飞机造成的伤害。FAA 和欧洲航空安全局（EASA）对非包容问题的研究已经有了几十年的历史和经验，目前制定的一些安全性评估体系日趋成熟完善，一些相关的软件也被应用到飞机的设计研制生产当中[2]。当前我国对非包容转子领域的研究还不够成熟，核心内容只能自主探索，进行我国自主的一系列非包容转子问题研究已经迫在眉睫。现有的一些研究主要涉及转子爆破引起的各种事故风险分析评估及安全性评估等方面。

本文给出功能危害树分析方法的风险分析方法，结合算例给出计算流程，分析非包容性转子碎片对燃油系统的影响。

1 国内外适航管理文件

1.1 我国适航管理文件

随着商用飞机的快速发展，为了不断提高飞机的安全性，我国颁发了相关适航规章，对减轻非包容性转子爆破造成危害发挥重要作用，我国适航管理文件见表 1。

表 1　我国适航管理文件

Table 1　China's airworthiness management documents

适航管理文件	主要内容
CCAR-23-R3	采用 FAA 的规定内容
CCAR-25-R4	把 AC20-128A 中的内容适航条例等在该规章中明确提及并使用，当发动机转子损坏时，务必采取设计防护措施手段，对飞机的危害减至最小

收稿日期：2017-09-13；　退修日期：2017-10-20；　录用日期：2017-10-29

基金项目：航空科学基金（2014ZD56009）；民用飞机专项科研（工信部联装［2016］37 号）

* 通信作者 . Tel.：021-67791146　E-mail：chenzhixiong1000@hotmail.com

引用格式：SUN Yingjun, CHEN Zhixiong, ZHANG Linshuai, 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. 孙缨军，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.

1.2 国外适航管理文件

国外民用航空起步早、发展相对成熟，相应的适航管理文件较为完善，已形成较为完整的体系，FAA 及 EASA 为发动机非包容性转子爆破颁发了相应的适航管理文件，为其他国家提供了很好的借鉴及经验。国外适航管理文件见表 2。

表 2 国外适航管理文件

Table 2 Foreign airworthiness management documents

适航管理文件	主要内容
AC20-128	给出了概率分析的方法
AC20-128A	提出由转子爆破对飞机飞行造成的损害降低到最小的设计准则，作为相关的指导方针，给出了可接受的防护措施
AC20-128B	根据 FAA 计划，适时根据技术发展状况发布
FAR 33	把非包容转子的完整特性问题，机匣的包容特性问题归结为飞机发动机生产商的问题
FAR 25	提出对转子爆裂非包容性的防护要求

2 风险分析方法

2.1 概念及定义

燃油系统转子非包容性爆破的风险评估是指根据非包容转子的尺寸大小、飞散角、进入进出角等特性，结合飞机燃油系统受影响区域或部件，对引起较高等级失效的受影响部件进行风险分析评估，判定转子爆破事故风险水平是不是超出规定的允许范围[3~5]。咨询通告 AC20-128A 于 1997 年发布[6]，由于非包容性损坏发生原因[7,8]（如图 1 所示）存在不确定性，有必要对飞机燃油系统非包容性爆破所造成的失效风险进行安全性分析评估。风险分析评估要把剩余风险定量化，根据 AC20-128A 中的概念定义，需要进行以下评估内容[6]，如图 2 所示。

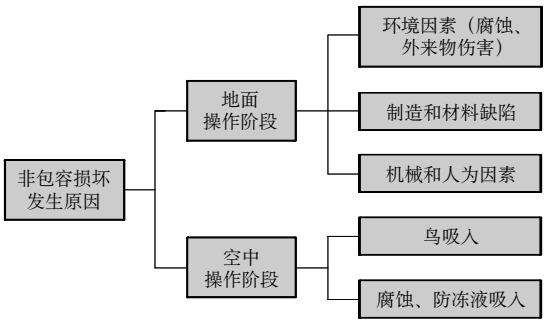

图 1 非包容损坏发生原因

Fig.1 Non-inclusive damage causes

不同飞行阶段中发动机失效概率如图 3 所示，评估中需要考虑发动机特性，重要系统及结构位置，非包容转子的飞散路径、进入进出角度，飞行过程中发生事故所在的阶段等因素[9,10]。

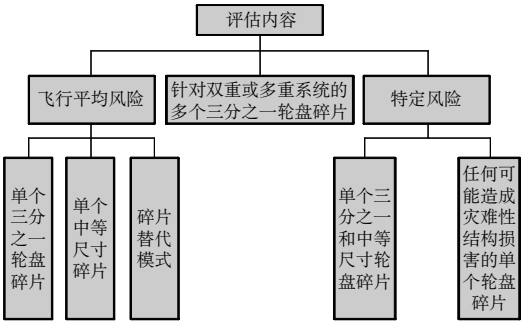

图 2 评估内容

Fig.2 Evaluation content

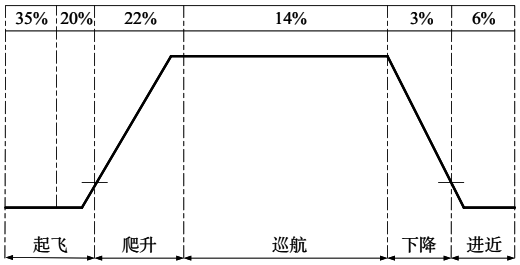

图 3 每个飞行阶段上发动机失效概率

Fig.3 The failure probability of occurrence of engine in each flight phase

2.2 燃油系统风险分析步骤

2.2.1 假设条件

转子问题涉及的系统和部件相当复杂，为了简化对转子爆破问题的分析、评估流程。AC20-128A 对转子非包容性破坏分析做如下几条假设[11]（应注意不同的飞机型号之间都有或多或少的区别，相应的假设条件需要根据具体的飞机状况与特定环境而定）：(1) 非包容转子爆破将导致无限能量的碎片垂直于发动机旋转轴飞出；(2) 在飞散角涉及到的范围内，转子碎片在每个方向上飞出的概率相同；(3) 被转子碎片接触到的目标就失去使用价值；(4) 转子碎片有非常大的能量，能够击穿接触到的零部件，并且能够维持原先的飞行轨迹；(5) 被转子爆破碎片击中的设备失效概率为 1；(6) 发生转子爆破时，不发生其他特定风险。

非包容转子从发动机飞出时在飞散角度范围内发生的概率假定为平均，因此，碎片撞击系统结构零部件的概率 P 等于平移风险角度 ϕ 的度数除以 360，即 $P=(\varphi_2-\varphi_1)/360$。

2.2.2 风险分析步骤

结合某商用飞机的设计进行燃油系统转子爆破风险评估，燃油系统转子非包容性损坏风险评估的步骤包括[12]：

(1) 确定燃油系统事故可能引起的功能危害性；

(2) 建立功能危害树如图 4 所示，确定燃油系统的失效区域和部件；

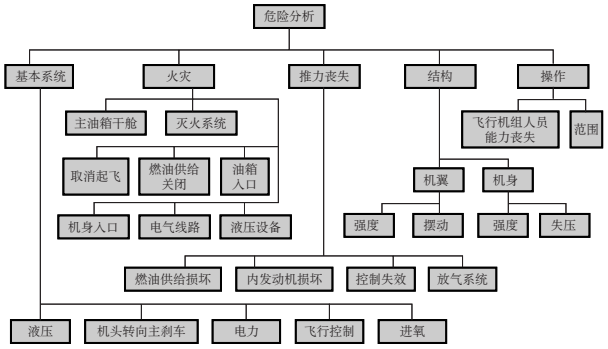

图 4 功能危害树

Fig.4 Function hazard tree

(3) 考虑对燃油系统产生危害的风险因子，并计算不同类别转子的每一种危害的风险，判断燃油系统的事故风险水平是不是超出规定的风险水平，如图 5 所示给出了燃油系统转子破坏的安全性分析评估流程图。

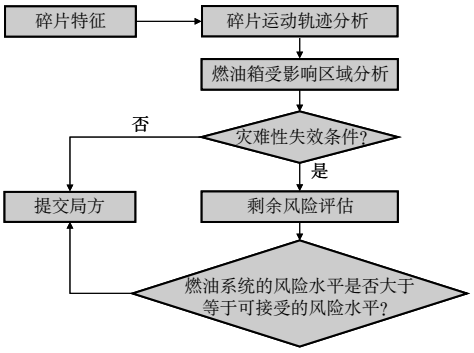

图 5 燃油箱转子非包容性损坏的安全性分析框图

Fig.5 Safety analysis of uncontained damage of fuel tank rotor

3 算例

本文以某型商用飞机为例，进行发动机非包容转子碎片对燃油系统影响的风险评估，该飞机采用的是在两侧机翼下部吊挂两台涡扇发动机的布局。主要考虑对燃油箱边界以及关键燃油管路和电缆束的影响，应该对所涉及的燃油箱穿透和燃油流失的影响进行评估，并制定相应的减轻策略。因为不同转子碎片类型的最大尺寸和飞散角状态有较大差异，1/3 转子碎片飞散角为 ±3°、中碎片飞散角为 ±5°、小碎片飞散角为 ±15°、风扇叶片碎片飞散角为 ±15°。转子碎片与系统结构部件接触时产生的能量大小不一，所以不同大小的转子碎片在不同的飞散角下对燃油系统造成的风险水平是不同的，受篇幅所限，本文研究对象为某型商用飞机（如图 6 所示），对其发动机不同转子碎片在 5° 飞散角飞出所辐射到的受影响范围（如图 7 所示），包括客舱、机翼、燃油箱、发动机等进行相应的风险分析评估。

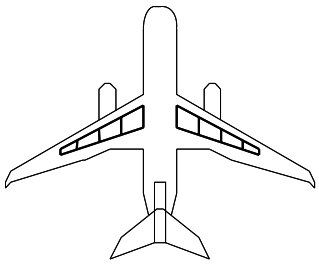

图 6 某型飞机二维平面简图

Fig.6 2D plane diagram of a certain type of aircraft

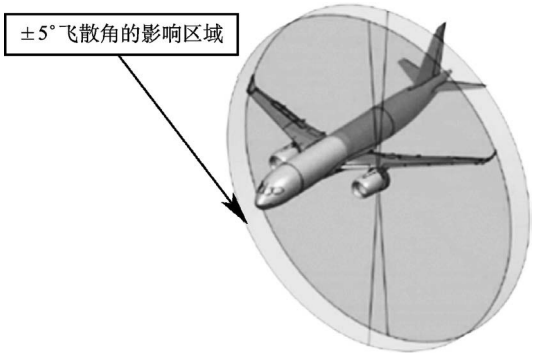

图 7 某型商用飞机非包容转子 5° 碎片影响区域

Fig.7 A commercial aircraft non-inclusive rotor 5° fragmentation affected area

根据某型商用飞机发动机转子 5° 碎片影响角度范围以及发生概率统计数据见表 3。经过公式计算得出非包容转子碎片导致灾难性事件后果的概率结果见表 4。

在整个飞行阶段导致灾难性事件的风险因子 f=0.336[9]。发生灾难性事件的概率为：$P=f\times P$。中央翼左非包容性转子碎片致使飞机发生灾难性失效的平均概率（发生在中央翼左侧失效概率的平均）为：(0.010416+0.007056) /2=0.008736。中央翼右非包容性转子碎片致使飞机发生灾难性失效的平均概率为：(0.010752+0.00672) /2=0.008736。中央翼非包容性转子碎片致使飞机发生灾难性失效的平均概率为：(0.008736+0.008736) /2=0.008736。

表 3 5° 碎片影响角度范围和发生概率

Table 3 Angle range and occurrence probability under influence of 5° fragmentation

	中央翼左		中央翼右	
	油量传感器	引射泵	油量传感器	引射泵
受影响的角度	166.7~178.0	170.3~177.8	359.0~10.5	358.4~5.7
发生的概率	0.031	0.021	0.032	0.020

表 4　灾难性事件后果的概率

Table 4　Probability of the consequences of catastrophic events

	中央翼左		中央翼右	
	油量传感器	引射泵	油量传感器	引射泵
发生灾难性事件的概率	0.010416	0.007056	0.010752	0.00672

通过算例验算得出：发动机 5° 非包容转子碎片致使飞机发生灾难性失效状态的平均概率为 0.008736，没有超过 AC20-128A 中设定的 0.05 的标准，符合适航条例安全飞行的要求。

4 相关保护措施

不同情况下（转子碎片的大小不确定，飞散角、碰撞角、进入进出角等不确定）非包容性转子爆破对燃油系统的破坏不一样，导致的事件后果严重度等级（分为灾难性的、危险的、较大的、较小的和无安全影响的 5 个等级[13]）不同。根据转子爆破对燃油系统产生的风险评估结果，需要特别关注会对燃油系统造成危险地或灾难性的失效。因此，为最大程度降低非包容性转子爆破所带来的危害影响，AC20-128A 中列出了能够采纳的设计保护措施，见表 5[6]。

表 5　AC20-128A 能够采纳的设计保护措施

Table 5　AC20-128A can adopt the design protection measures

方法	主要内容
防火	灭火系统、关键功能的防火、燃油箱、可燃液体的关断阀门
保持推力	发动机控制、燃油储备、其他对发动机的损坏
保持飞机操纵	液压体系、反推体系、应急能源、飞控体系
对飞机中的乘员驾驶员进行保护	驾驶舱、高海拔运行的客舱释压
保持结构完整性	安装相应的装置防止结构受到灾难性的破坏

5 结论

本文给出了一种商用飞机发动机转子爆破对燃油系统影响的风险分析方法，以商用飞机燃油系统为例，介绍了非包容转子爆破风险水平的分析过程，表明此方法能够应用于该方面问题的分析研究。经过风险评估，为了尽量避免相关灾难性事故的发生，应该在设计初期就尽量避免较大碎片的产生。通过设计优化，让非包容性转子碎片的飞散角角度尽量小，这样对燃油系统尤其是燃油箱的危害就会降至最低，使得燃油系统的安全性得到足够的保障。并且建立了功能危害树，有利于对转子碎片风险进行分析评估，算例验证了计算结果符合适航标准，并提出了相应的保护措施。 AST

参考文献

[1] 司马骏 . 民机系统发动机转子爆破特定风险分析方法 [J]. 民用飞机设计与研究，2016（2）：37-40.
SIMA Jun. Particular risk analysis method of engine rotor burst for civil aircraft system [J]. Civil Aircraft Design & Research，2016（2）：37-40.（in Chinese）

[2] Federal Aviation Administration Operations Planning Research & Development Office. Federal aviation administration research & development annual review [M]. America：Federal Aviation Administration，2006：24-25.

[3] 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 Xuejiao，FU Renhe. The research on the assessment of uncontained debris hazard [J]. Equipment Manufacturing Technology，2011（2）：21-23.（in Chinese）

[4] Federal Aviation Regulations（FAR）Part25：Transport category airplanes [S].Boston：Federal Aviation Administration，2003.

[5] 中国民用航空局 . 中国民用航空规章：第 25 部：运输类飞机适航标准 [S]. 中国民用航空局，2011.
Civil Aviation Administration of China. China Civil Aviation Regulations Part25：transport category airplanes [S].Civil Aviation Administration of China，2011.（in Chinese）

[6] AC20-128A　Design considerations for minimizing hazards caused by uncontained turbine engine and auxiliary power unit rotor failure [S].Boston：Federal Aviation Administration，1997.

[7] 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 Rucheng，LI Xianzhe，LI Yang，et al. Design of uncontained engine rotor fragments failure during airplane design [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2016，37（1）：351-363.（in Chinese）

[8] 张燕军，孙有朝，曾海军，等 . 转子非包容失效安全性的计算机辅助分析方法 [J]. 航空学报，2013，34（2）：291-300.
ZHANG Yanjun，SUN Youchao，ZENG Haijun，et al. Computer-aided analysis method for non-inclusive failure of rotor [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2013，34（2）：291-300.（in Chinese）

[9] 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 Yansong，CHEN Xiyuan，et al. The risk analysis of uncontained engine rotor fragments of one aircraft [J]. Equipment Manufacturing Technology，2014（4）：30-32.（in Chinese）

[10] 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. (in Chinese)

[11] 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, 41.
YANG Wanli. Risk quantification method for airframe damage due to rotor burst [J]. Aeroengine, 2012, 38 (3): 29-33, 41. (in Chinese)

[12] 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 Zhida. Analysis of uncontained engine rotor events for civil airplane [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011 (13): 75-79. (in Chinese)

[13] 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 Dongming, SUN Youchao, LI Longbiao. 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. (in Chinese)

(责任编辑 杨晓彤)

作者简介

孙缨军 (1971-) 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 持续适航。

Tel: 021-64930025

E-mail: sunyingjun_hd@caac.gov.cn

陈志雄 (1977-) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 安全性评估与持续适航, 航空发动机状态监测。

Tel: 021-67791146

E-mail: chenzhixiong1000@hotmail.com

The Risk Assessment of the Effect of Uncontained Engine Rotor Fragments on Fuel System of Commercial Aircraft

SUN Yingjun[1], CHEN Zhixiong[2,*], ZHANG Linshuai[2], CAI Jing[3]

1. Shanghai Aircraft Airworthiness Certification Center of CAAC, Shanghai 200335, China

2. School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

3. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: Aircraft fuel system is one of the most important systems of aircraft, and its safety is critical. However, there is a potentially catastrophic failure model that must be disposed of at the aircraft conceptual design stage as early as possible. This failure mode is the engine-related "non-inclusive rotor blasting". Based on functional hazard tree analysis method, the study of relevant airworthiness regulations and advisory circulars and other documents were carried out. The effective risk analysis process was obtained. Through the concrete example, it can be proved that the result is consistent with the requirements of the airworthiness regulations and the protective measures that can be taken after the non-inclusive failure of the engine rotor debris. In order to meet the airworthiness standard, an example was given to analyze the risk of non-inclusion rotor blasting for a commercial aircraft, and the failure level of the affected system and system were determined. The conclusion was given, which is related to other models design work to provide reference.

Key Words: commercial aircraft; fuel system; rotor blasting; uncontained; risk assessment

Received: 2017-09-13; **Revised:** 2017-10-20; **Accepted:** 2017-10-29

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2014ZD56009); Civil Aircraft Specialized Research of MIT [2016] No.37

***Corresponding author. Tel.:** 021-67791146 **E-mail:** chenzhixiong1000@hotmail.com