

民机系统发动机转子爆破 特定风险分析方法

Particular Risk Analysis Method of Engine Rotor Burst for Civil Aircraft System

司马骏 / Sima Jun

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘要:

基于美国联邦航空局咨询通告给出的发动机非包容转子爆破特定风险安全性评估指南,提出了一种简单易用的发动机非包容转子爆破安全性分析方法。建立了简化的转子碎片碰撞角度计算模型,以确定受转子碎片影响的系统部件;改进了失效部件组合检查单,提高分析工作效率,并确定转子碎片对系统的安全性影响。相比于传统分析方法,简化了转子爆破风险安全性分析过程,减少了分析工作量,适用于飞机系统研制初期对转子爆破风险的危害性进行保守性评估,以指导系统架构优化设计。

关键词:安全性分析;民机系统;发动机转子爆破;特定风险

中图分类号: V231.96

文献标识码: A

[**Abstract**] Based on the safety assessment guidance of uncontained engine rotor burst given in FAA advisory circular, an easy and convenient safety analysis method is proposed for engine rotor burst risk. A simplified fragment collision angle calculation model is established to check the system components affected by rotor fragment. An improved checklist for failure components is established to reduce human analysis workload and verify the rotor fragments' safety effect on the aircraft system. Analysis process is simplified and workload is reduced compare to traditional rotor burst risk safety analysis method. The method is applicable to preliminary stage of civil aircraft system development, used for system hazards assessment caused by engine rotor burst risk and optimizing the system architecture.

[**Key words**] safety analysis; civil aircraft system; engine rotor burst; particular risk

0 引言

民用飞机系统架构设计与安全性分析是一个重复迭代的过程,特定风险分析是安全性分析工作的一部分^[1]。特定风险是指可能导致飞机及其系统功能失效,影响飞机运行安全的外部事件或因素^[2]。发动机非包容转子爆破是民用飞机运营过程中典型的特定风险事件,虽然发生的概念很小,但一旦发生通常会对飞机安全性产生严重影响。民用飞机适航取证过程中会关注针对发动机转子爆破展开的安全性分析与设计,中国运输类飞机适

航标准 CCAR 25 第 903(d)(1) 条规定必须采取设计预防措施,能在一旦发动机转子损坏或发动机内起火烧穿发动机机匣时,对飞机的危害减至最小^[3]。

美国联邦航空局 FAA 于 1997 年发布了咨询通告 AC 20-128A,为非包容转子爆破特定风险的安全性分析与设计提供指南,包括降低转子爆破危害的设计措施、转子爆破安全性分析方法以及可接受的剩余风险值^[4]。AC 20-128A 给出的转子爆破分析方法可靠有效,在民用飞机安全性分析与设计中得到了广泛应用。

民用飞机系统研制初期,系统架构设计不尽完善,采用 AC20-128 的建模方法难以对转子爆破进行准确建模。此外,AC20-128 提供的安全性分析过程较为复杂且工作量大。本文基于 AC20-128 给出的转子爆破安全性分析指南,给出了一种简化的发动机非包容转子爆破风险安全性分析方法,旨在对民用飞机系统研制初期的转子爆破风险进行初步的保守性评估,指导系统架构优化与改进。该方法首先通过建立简化的转子爆破碎片碰撞角度计算模型,来确定受影响的系统部件及其碰撞角度范围。其次,基于受影响的部件和碰撞角度数据,建立一种简单直观的失效部件组合影响检查单,用于分析不同失效部件组合对系统造成的危害等级。

1 转子碎片碰撞角度计算模型

分析转子碎片对飞机系统造成的危害,首先需要建立转子碎片碰撞角度计算模型,以确定转子沿任一可能路径飞出时,与碎片发生碰撞的系统部件以及碰撞角度范围。转子碎片飞散角如图 1 所示。

1.1 转子碎片扫描路径建模

当发动机发生转子爆破时,意味着发动机某些轮盘或叶片断裂,产生不同尺寸碎片,这些碎片具有不同能量,并沿不同的飞散角飞散出来。碎片飞散角是指从单级转子旋转平面中心向前和向后所测量的角度,如图 1 所示。此外,碎片可能沿发动机转轴 $0^\circ \sim 360^\circ$ 任一角度飞出,碎片碰撞角度为碎片与部件发生碰撞时的飞出角度,定义为 ϕ ,如图 2 所示。

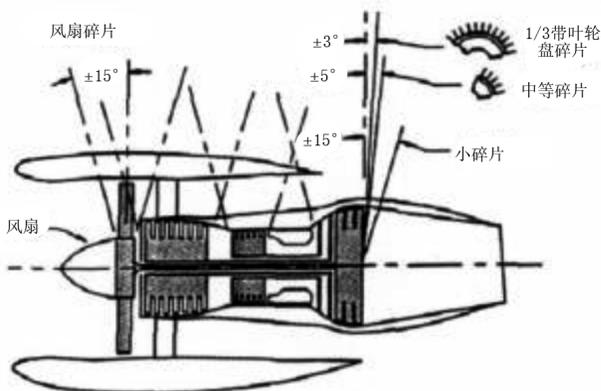


图 1 转子碎片飞散角示意图

为了简化转子碎片扫描路径模型,做以下保守性的建模假设:

(1) 转子爆破时只有一块碎片飞出,且碎片具有

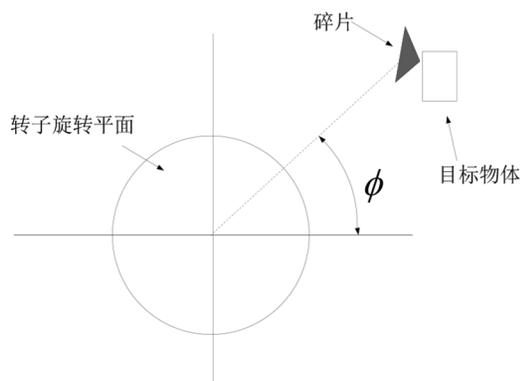


图 2 转子碎片碰撞角示意图

很大能量,可穿透碰撞到的部件,且不会改变轨迹方向;

(2) 碎片飞出路径的宽度为碎片飞散角范围。

基于建模假设条件,建立碎片扫描路径模型如图 3 所示,碎片扫描模型可沿转子轴 $0^\circ \sim 360^\circ$ 旋转,其中扫描宽度为碎片飞散角 Δr 范围, $\Delta\phi$ 为碎片沿扫描路径飞出并与目标物体发生碰撞时的角度范围。

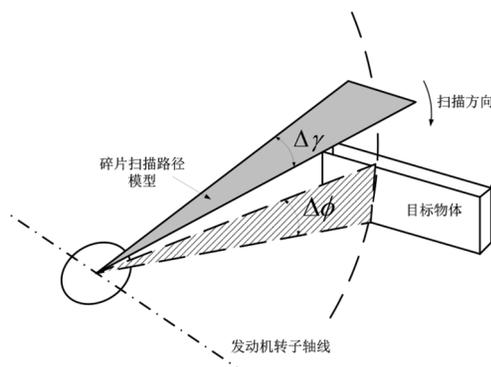


图 3 转子扫描路径模型

1.2 失效部件碰撞角度计算方法

碎片扫描模型沿转子轴 $0^\circ \sim 360^\circ$ 旋转,若某一部件被检测到在某个角度与碎片发生碰撞,则保守性认为该部件丧失功能,即部件失效。失效部件与碎片碰撞角的具体计算方法为:

(1) 碎片模型沿扫描方向运动,当碎片扫描路径与该部件发生第一次碰撞时记下碰撞角度 ϕ_1 , ϕ_1 定义为碎片与部件的碰撞进入角;

(2) 让碎片模型沿扫描方向反向运动,当碎片飞出路径与该部件再次发生碰撞时记下碰撞角度 ϕ_2 , ϕ_2 定义为碎片与部件的碰撞退出角;

(3) 进一步根据碎片与部件的碰撞进入角、退出角,可计算碰撞角度范围 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ 。

2 失效部件组合检查单

根据转子碎片碰撞角度计算模型,可找出所有失效部件及碎片碰撞角度,并确定失效部件检查单,典型检查单见表1。实际分析过程中,由于检查单中的失效部件数量非常多,且不同失效部件的碰撞角会有重合区域(即碎片沿某一角度飞出时,会同时导致多个部件失效),利用表1检查单不能直观判断在任一碎片飞出路径上所有的失效部件组合,大大降低了分析失效部件组合影响的工作效率。

表1 典型的失效部件检查单

失效部件	碰撞角度	
	进入角	退出角
部件1	2°	5°
部件2	4°	8°
部件3	3°	5°
...	...	
部件N	355°	359°

表2 改进的失效部件检查单

失效部件	碰撞角度																																							
	1° ~ 360°																																							
部件1																																								
部件2																																								
部件3																																								
...																																								
部件N																																								

3 分析方法应用

本节以民用飞机电传飞行控制系统为例,进一步说明如何使用本文1、2节给出的转子爆破分析方法开展安全性分析。

(1) 检查飞控系统失效部件

使用转子碎片扫描路径模型与碰撞角计算方法,找出所有与碎片发生碰撞的飞控系统部件,如通道1副翼作动器、通道2副翼作动器、通道3扰流板作动器等。

(2) 获得接口系统失效部件

飞控系统的功能运行还依赖于其他接口系统

为了提高失效部件组合影响的分析工作效率,改进失效部件组合检查单如表2所示。该检查单将碰撞角度分为360等分,360个栅格依次代表1°~360°,并通过带颜色的栅格(表2中黑色部分)来描述失效部件的碰撞角。例如,表中部件1的碰撞进入角与退出角分别为2°、5°,则将代表2°~5°的栅格填充为黑色。通过改进的检查单可以很方便的开展失效模式分析工作,例如当碎片飞出角度为2°时,失效模式为部件1丧失;碎片飞出角度为3°时,部件1、部件3丧失;碎片飞出角度4°时,部件1、部件2、部件3丧失。

利用改进的失效部件检查单,在1°~360°角度范围内以1°角度为步长,逐个分析每个碎片飞出角度对应的失效部件组合,则可获得转子碎片可能导致的所有失效组合。

根据确定的所有失效组合,结合系统故障树分析结果,可确定任一失效组合导致的系统级失效状态,即对系统的危害。

的正常工作,安全性分析中同样需要考虑接口系统的故障状态,如液压系统、电源系统等。根据接口系统开展的转子爆破安全性分析结果,获得所有接口系统的失效部件。

(3) 建立失效部件组合检查单

根据(1)、(2)获得飞控系统与接口系统失效部件,建立失效部件组合检查单如表3所示。

(4) 对飞控系统的危害性影响

为了保证系统安全性与可用性要求,飞控系统通常采用多余度配置,如左右两块副翼会采用四个独立的作动器控制通道进行控制,每个通道使用独立的液压源与电压源。对于每个独立的控制通道,

该通道任一部件失效(如作动器、液压管路、供电设备等)均会导致该控制通道功能失效。

根据表 3 给出的检查单,结合飞控系统故障树

分析结果,可得到检查单中所有失效部件组合导致的飞控系统级失效事件,并得到转子爆破对飞控系统的危害性影响等级见表 4。

表 3 失效部件检查单

失效	碰撞角度																			
部件	1° ~ 360°																			
通道 1 副翼作动器																				...
通道 2 副翼作动器																				...
通道 1 液压管路																				...
通道 3 液压管路																				...
通道 4 供电设备																				...

表 4 对飞控系统的危害性

碰撞角度	系统失效	危害等级
1°	通道 1 失效	较小级
2°	通道 1,3 失效	较大级
3°	通道 1,3,4 失效	危险级
4°	通道 1,2,3,4 失效	灾难级
5°	通道 2,4 失效	较大级

(5) 系统架构改进的设计考虑

根据表 4 给出的转子爆破对飞控系统的危害性分析结果,重点关注会对系统造成危险级或灾难级的失效部件组合,并考虑采取部件防护、隔离等措施,改进系统架构,尽量避免多个冗余通道的设备布置在转子碎片同一飞出路径上。

4 结论

本文给出了一种民机系统发动机转子爆破特定风险安全性分析方法,建立了简化的转子碎片碰撞角度计算模型,并改进了失效部件组合检查单。以民用飞机飞控系统为例给出了发动机转子爆破风险的安全性分析过程,表明该分析方法简单有效。

文中提出的分析方法旨在应用于民机系统研制初期,对初步定义的系统架构进行保守性评估。在飞机系统架构趋于完善的详细设计阶段,应考虑建立更精确的转子碎片模型,在初期分析基础上重点分析转子碎片危害等级严重的失效组合,以保证系统架构设计符合安全性指标要求。

参考文献:

[1] SAE ARP 4754A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems [S]. America: The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 2010.

[2] SAE-ARP4761 Guidelines and Methods for the Safety Assessment Process on Airborne Systems and Equipments[S]. America: The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 1996.

[3] 中国民用飞机航空局. CCAR-25-R4 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.

[4] Advisory Circular. AC20-128A Design Considerations for Minimizing Hazards Caused by Uncontained Turbine Engine and Auxiliary Power Unit Rotor Failure [S]. Boston: Federal Aviation Administration, 1997.

[5] FAR25-Part25-airworthiness standards; transport category airplanes[S]. Boston: Federal Aviation Administration, 2003.

[6] 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.

[7] 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: 373- 374.

[8] 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.

[9] 黄庆南, 张连祥, 刘春华, 等. 航空发动机转子非包容顶层事件安全性分析与思考[J]. 航空发动机, 2009, 35(2): 6- 9.