

基于三维软件辅助的轮胎爆破 特定风险评估方法研究

Research for Assessment Method of Wheel and Tyre Failure Particular Risk Based on the 3D Model Building Software

吕 军 / Lü Jun

(上海飞机设计研究院, 上海 200232)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200232, China)

摘 要:

采用偏安全的假设,建立了符合 CS25.734^[1]及 AMC25.734^[2]的轮胎爆破三维仿真模型,对中国民用航空规章 FAR/CCAR25.729(f)^[3-4]及 SAE ARP 4761^[5]中提出的轮胎爆破风险给出了安全性评估的方法。用分析的方法支持此适航规章条款的符合性验证工作。

关键词: 轮胎爆破;特定风险;安全性评估

中图分类号: V226+.8

文献标识码: A

[Abstract] By means of technical hypothesis, creating the wheel and tyre failure 3D models in accordance with the regulation of CS25.734^[1] and AMC25.734^[2], and giving the safety assessment method for the wheel and tyre failure risk which brought forward by FAR/CCAR25.729(f)^[3-4] and SAE ARP 4761^[5]. The analytical methods support the compliance work of the airworthiness regulation items.

[Key words] wheel and tyre failure; particular risk; safety assessment

0 引言

民用航空规章 FAR/CCAR 25.729(f) 条和 SAE ARP 4761 提出,民用飞机在设计时,需评估轮胎爆破特定风险所产生的高压/碎片对关键系统及结构的安全性影响。目前,国内针对轮胎爆破仅 ARJ21-700 飞机走完此符合性验证流程。2014 年 EASA 发布了 CS 25.734 及其可接受符合性方法 AMC25.734《Protection against wheel and tyre failures》,对轮胎爆破的模式进行了完善,现已被中国民航 CAAC 认可,并作为国产新研大型客机轮胎爆破的适航规章要求。

本文采用偏安全的假设、以三维建模软件为分析工具和手段,对此条款的适航符合性支持方法进行探讨和研究。

1 条款要求和背景说明

轮胎爆破是民用飞机在实际运营中经常发生的风险,轮胎爆破产生的高压气流/碎片等可能打坏起落架、机翼、平尾等机身结构或系统,严重影响飞行和人员安全,甚至造成灾难性的后果^[6]。针对这一危害,航空界在过去的几十年中,采用了以下有效的措施来降低此风险^[7-8]:

(1) 冲氮气的服役轮胎;(2) 胎压监控系统 (TPMS);(3) 改进的机轮压力释放特性;(4) 刹车温度监控系统 (BTMS);(5) 发布 FAA/JAA 规章或 TGM^[9]临时指导材料;(6) 改进的翻修检查设备和技术。

其中 JAA (Joint Aviation Authorities) 发布的临时指导材料 (TGM) 提供给飞机制造商一个在研制

阶段定义飞机轮胎和机轮危险的可用方法,并且已被用来表明对 Joint Aviation Requirements, JAR 25.729(f) 和 JAR 25.1309 等条款的符合性。这一临时指导材料给出了爆破轮胎、失效轮胎和轮缘脱落的风险区域。但它对满足最新要求的设备或不同结构/技术类型的轮胎(斜交胎及子午胎)没有提供参照,也没有对 TSO - C135^[10](在 TGM 之后发布的)中所要求的整合释压装置的机轮提供参考。

有鉴于此,欧洲航空安全委员会在大量的轮胎爆破事件数据搜集和研究的基础上,于2013年底发布的 CS-25 AMENDMENT 14^[11]中,删除了原有的 CS.25.729(f)“Retracting mechanism”,新增加了 CS.25.734“Protection against wheel and tyre failures”,并且发布了相应的可接受的符合性方法 AMC.25.734,此修正案在征询各方反馈意见修改后于2014年正式发布。

根据 AMC25.734 的定义,轮胎爆破模式根据收放状态和轮胎爆破或胎面脱落形式一般有以下几种模式,如表1所示。

表1 民用飞机适用的轮胎爆破模式

序号	爆破模式	起落架收放状态	主要破坏形式
1	轮胎碎片模式	起落架放下	轮胎碎片
2	爆胎空气喷流压力效应	起落架收上	高压气体冲击波
3	甩胎模式	起落架放下	甩胎
4		起落架收上或收起中	甩胎
5	轮缘碎片	起落架放下	轮缘碎片

2 基于三维模型的轮胎爆破的评估

在开展轮胎爆破具体分析时,可基于机轮和轮胎的风险模型来开展。一方面,通过早期对系统和结构数模的检查来消除由于设计或布置原因所导致的灾难性/危险性失效。另一方面,通过这一过程来增强供应商和系统设计团队针对机轮和轮胎失效场景的设计自主性。

设计人员通常基于三维建模软件(如 CATIA),按照满足适航要求的轮胎爆破失效模式,依据 TRA (Tyre and Rim Associate Standard)^[12]中飞机轮胎的物理尺寸参数,基于合理保守性假设建立起各个机轮和轮胎失效模式的仿真模型^[13]。

2.1 满足适航要求的机轮和轮胎失效模式

因篇幅有限,本文仅以轮胎碎片模式为例。根据 AMC25.734,当轮胎与地面接触时发生的爆破会抛射出轮胎碎片,需要考虑两种尺寸的轮胎碎片,这两类轮胎碎片主要认为来自于轮胎胎面,碎片的抛射区域如图1所示。

(1)“大碎片”尺寸为 $W_{SG} \times W_{SG}$,厚度为完整胎面与最外面的帘线层厚度(例如,增强层或者保护层)。抛射范围角度 θ 为 15° 。

(2)“小碎片”主要指其质量为整个轮胎质量1%的碎片,其冲击载荷分布面积为胎面总面积的1.5%。抛射范围角度 θ 为 30° 。

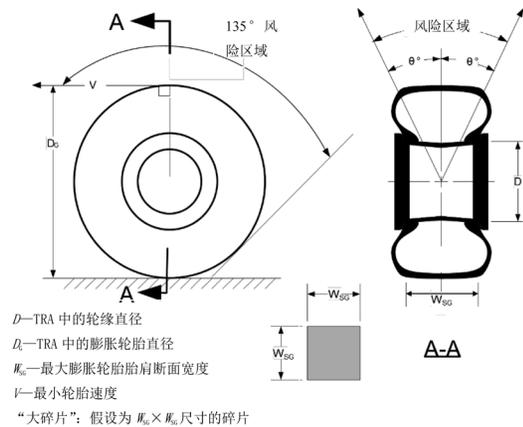


图1 轮胎碎片模型

2.2 获取飞机轮胎相关的物理参数

目前子午胎已在民用飞机上广泛采用,其轮胎包线如图2所示,假设新研飞机主起轮胎采用的子午胎型号为46x17.0R20,查找 TRA 中对应的数据,可得到表2中用于建模的参数。

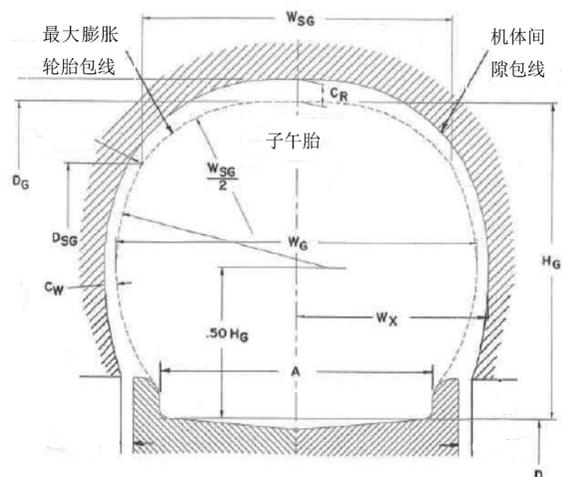


图2 轮胎包线尺寸示意图

表 2 主起轮胎部分参数

参数	D	D_c	W_{sc}	W_c
主起轮胎	508 mm	1 207 mm	405.13 mm	449.58mm
D =轮缘直径, D_c =轮胎直径, W_{sc} =最大膨胀轮胎胎肩断面宽度, W_c =最大膨胀轮胎断面宽度				

2.3 模型建立假设

在建立轮胎爆破仿真模式时,作如下合理和保守性假设:

(1)受轮胎爆破影响区域的设备,如其许用承力范围小于爆破产生的作用力大小(轮胎爆破一起落架收上时受高压气流冲击波作用,其它模式下为轮胎/轮缘碎片撞击或胎带抽打力作用),则认为被冲击设备失效;反之,需提供分析材料来证明设备仍能正常工作;

(2)暴露在轮胎爆破影响下的液压管路和电缆都失效,即便这些管路和电缆安装在那些无防护特性并且不能承受轮胎爆破冲击载荷影响的结构部件之后;

(3)碎片不会从其原始轨迹偏离。

2.4 建立轮胎碎片模式的三维仿真模型

定义轮胎碎片向后抛射并与水平地面之间的夹角为 α ($0 \sim 135^\circ$,如图 1 所示),轮胎碎片与机轮平面之间的夹角为 θ (大碎片为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,小碎片为 $-30^\circ \sim 30^\circ$),以飞机坐标系为依据,在三维建模软件中严格按照起落架和轮胎放下时的物理位置(需考虑最大起飞重量下起落架放下时的压缩行程),建立以轮胎碎片扫掠角 θ 和抛射角 α 为变量的运动模型(如图 3 所示),相应的模型组成如表 3 所示。

表 3 轮胎碎片扫掠模型组成

名称	碎片模型组成	参数 θ 设置	参数 α 设置
轮胎碎片模型	左侧外主轮胎小碎片模型	$15^\circ < \theta_{L0} \leq 30^\circ$	$0^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$
	左侧外主轮胎大碎片模型	$-15^\circ \leq \theta_{L0} \leq 15^\circ$	
	左侧内主轮胎大碎片模型	$-15^\circ \leq \theta_{L1} \leq 15^\circ$	
	左侧内主轮胎小碎片模型	$-30^\circ \leq \theta_{L1} < -15^\circ$	
	右侧内主轮胎小碎片模型	$15^\circ < \theta_{R1} \leq 30^\circ$	
	右侧内主轮胎大碎片模型	$-15^\circ \leq \theta_{R1} \leq 15^\circ$	
	右侧外主轮胎大碎片模型	$-15^\circ \leq \theta_{R0} \leq 15^\circ$	
	右侧外主轮胎小碎片模型	$-30^\circ \leq \theta_{R0} < -15^\circ$	

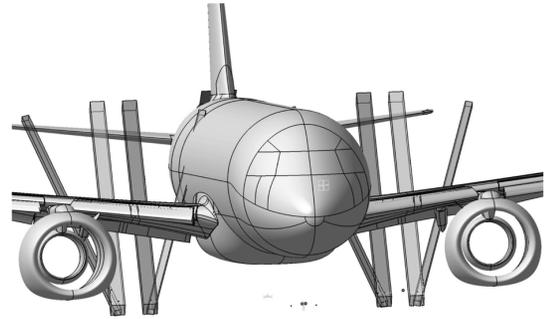


图 3 轮胎碎片三维运动仿真模型

2.5 基于轮胎碎片仿真模型开展评估

将需要检查的系统/部件加载进轮胎碎片扫掠模型,进入 DMU Kinematics Simulator 模块(数模运动仿真模块),当轮胎碎片扫掠模型在运动过程中与待检查的系统/部件发生碰撞,记录下此时影响该设备的扫掠角 θ 和抛射角 α 的角度范围(如图 4 所示),按照表 4 所示的结构化分析方法,借助 FMEA 识别受影响系统设备的故障模式,并根据系统功能危险性分析 SFHA、系统故障树 SFTA 等确定各个设备相关的系统级功能失效状态,并追溯到相关的飞机级功能和飞机级功能危险。同时,如有必要可以进行定量计算,确定与此失效状态相应的风险概率。

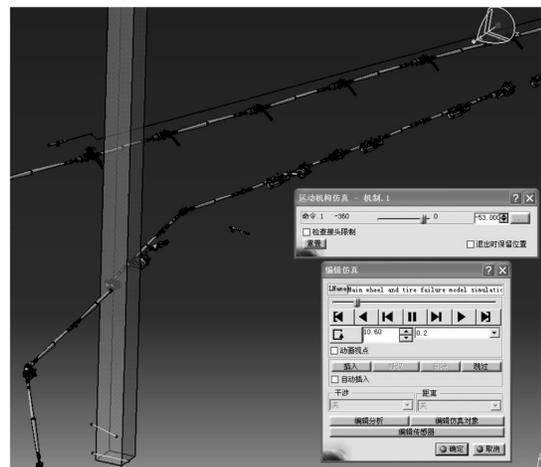


图 4 轮胎碎片扫掠模型的使用

2.6 对所发现风险事件的处理

在进行轮胎爆破风险评估时,需重点关注会发生以下风险事件:

- (1) 轮胎爆破引起的轮胎失压;
- (2) 由轮胎爆破导致飞机最大运行海拔状况下的快速失压;
- (3) 由轮胎爆破导致区域内多条液压源管道功能丧失;

表4 轮胎碎片撞击影响表(示例)

场景		设备(电缆、液压管路)在影响区域	失去的部件名称	部件号(DM编号)	FMEA索引	追溯到系统级功能危险		追溯到飞机级功能	追溯到飞机级功能危险	
角度 θ	角度 α					SFHA失效状态	对系统的影响		AFHA失效状态	对飞机或人员的影响

	36°-50°	设备在区域内	燃油切断阀	XXXX	FMEA_28_XXX	XXXXX ALL III	无法给受影响的一侧发动机提供燃油	提供燃油	FXXXX ALL III	潜在的无法隔离着火,对飞机的影响为潜在的灾难性故障
-15°~10°	70°-75°	设备在区域内	1.右缝翼系统A#扭力管组件 2.右缝翼B#站位倾斜传感器 3.右缝翼系统C#扭力管组件	XXXX XXXX XXXX	FMEA_27_XXX	XXXXX ALL I	缝翼非对称运动超限	提供增压控制功能	FXXXX ALL I	飞机产生过度的横滚力矩,无法控制飞机姿态导致飞机失控;机组和乘客可能由于飞机坠毁而死亡
	...									

(4) 由于收起时轮胎爆破的影响,导致起落架不能收上或舱门关闭;

(5) 由于轮胎爆破产生碎片的撞击,导致潜在的燃油箱破裂;

(6) 轮胎爆破时,对飞控系统、机翼后缘结构等的影响;

(7) 轮胎爆破碎片对发动机的影响(碎片是否会被吸入发动机中)。

针对使用模型时所发现的上述危险事件(如表4中缝翼非对称运动超限的I级失效状态),对相关机体结构进行试验验证、动强度和损伤容限分析后,明确判断轮胎爆破会导致此I,II类失效状态,则应制定相应的设计更改方案或防护措施,并提供相关设计更改方案或防护措施有效性的证据,从而将此I,II类功能危险事件予以消除或减缓到可接受的安全性水平。

3 结论

本文提出了基于三维仿真软件辅助的轮胎爆破安全性评估方法,给出了建立仿真模型的方法和风险评估步骤。按照此方法在新型飞机的研制周期里尽早开展轮胎爆破的评估工作,并随研制进度不断迭代,可以有效地支持民用飞机轮胎爆破的适航取证工作。

参考文献:

[1] European Aviation Safety Agency. CS-25 certification speci-

fications for large aeroplanes[S]. 2008.

[2] European Aviation Safety Agency. AMC25. 734 protection from debris impacts[S]. 2014.

[3] USA Federal Aviation Administration. 14 CFR, PART25, airworthiness standards: transport category airplanes[S]. 2007.

[4] 中国民用航空局. CCAR25 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.

[5] SAE Standard ARP4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment[S]. 1996. 10.

[6] 王敏芹,郭博智. 民用飞机事故/事故征候统计与分析手册[M]. 北京:航空工业出版社,2015:31-32.

[7] SAE AIR5699 A. Guide for the Damaging Effects of Tire and Wheel Failures[S]. 2007. 4.

[8] USA Federal Aviation Administration. TSO-C62e aircraft tires[S]. 2006.

[9] Joint Aviation Authorities. JAA temporary guidance material, TGM/25/08 (issue 2), wheel and tire failure model[S]. 2002.

[10] TSO - C135. Transport Airplane Wheels and Wheel and Brake Assemblies[S]. 2002. 5.

[11] European Aviation Safety Agency. Notice of proposed amendment (NPA) 2013-02, protection from debris impacts[S]. 2013.

[12] Tire and Rim Association (TRA) aircraft yearbook[S]. 2009.

[13] 曾令慧,陈丽华. CATIA 应用基础[M]. 杭州:浙江大学出版社,2013:165-182.