

民用飞机燃油箱系统闪电防护分析方法研究

田玉雯* 张斌 李燕

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 民机燃油箱系统的闪电防护是燃油箱安全的重要研究范畴,本文依据 FAA 的 25-146 号修正案和咨询通告 AC25.954-1,介绍了民用飞机燃油箱系统闪电防护分析方法。在点火源防护分析思路的基础上,针对闪电引起的点火源,在明确飞机闪电分区后,可通过容错类设计或非容错类设计分别开展分析。针对容错类设计,可通过证明防护设计特征有效且可靠来表明符合性,无需进一步分析失效概率。针对非容错类设计,通过定性和定量分析法进行评估。在定性分析时,需评估非容错特征失效且引起点火源的概率小于 $1E-5$ 。在定量分析中,可结合燃油箱可燃性、关键闪电和防护特征失效概率确保闪电引起燃油蒸气点燃的概率为极不可能。同时,根据闪电环境定义的电流振幅和波形对防护设计特征进行有效性验证。

关键词: 燃油箱系统;闪电;点火源;容错设计;非容错设计

中图分类号: V228.1

文献标识码: A

OSID:



0 引言

飞机在雷暴区内或周边飞行时,经常会被闪电击中或处于闪击点附近。无论是直接还是间接影响,对于飞机来说通常都是灾难性的^[1]。据国外研究中心数据统计,每架飞机平均每 1 000 fh 就会遭受一次雷击^[2]。高能电流进入飞机后可能产生电弧或电火花点火源,接触燃油蒸汽后就会导致燃油箱爆炸,造成机毁人亡的事故。

2018 年,FAA 官方发布了 FAA-2018-20471 号文件,颁布 25-146 号修正案,对燃油箱系统闪电防护相关条款进行了修订,主要修订内容为将闪电导致的点火源从 25.981(a)(3)移至 25.954,理清了闪电防护要求与条款的隶属关系,以便于工业界的理解和验证。目前,本修正案内容暂未纳入 CCAR-25。

针对闪电引起的点火源,本文基于 FAA 的 25-146 号修正案和相关资讯通告 AC25.954-1,解读并研究了民用飞机燃油箱系统闪电防护的分析思路。

1 闪电防护适航要求

针对民机闪电防护设计,通常需满足的条款如表 1 所示。本文主要研究 FAR 25.954 条款的最新要求,即燃油系统的安装和设计必须防止由于闪电及其效应造成燃油蒸气点火为极不可能。

表 1 闪电防护适航条款

序号	条款项目	条款名称	主要内容
1	25.581	闪电防护	飞机必须具有防止闪电引气灾难性后果的保护措施,如搭接和可接受的分流措施等
2	25.899	电搭接和防静电防护	飞机具有电搭接和防静电保护的设计,使得静电积聚最小不再危及飞机、人员或电子电气系统的正常运行
3	25.954	燃油系统的闪电防护	燃油系统的安装和设计必须防止由于闪电及其效应造成燃油蒸气点火为极不可能的,必须考虑到可燃性、关键闪电以及燃油系统内部的失效
4	25.1316	系统闪电防护	保证飞机在遭遇闪电环境时,不会造成系统功能失效以致影响或妨碍飞机安全飞行

* 通信作者. E-mail: tianyuwen@comac.cc

引用格式: 田玉雯,张斌,李燕. 民用飞机燃油箱系统闪电防护分析方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):76-81. TIAN Y W, ZHANG B, LI Y. Research on the fuel tank system lightning prevention analysis method for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):76-81(in Chinese).

在 FAA 颁布的 25-146 号修正案中描述到,在表明 25.981(a)(3) 条款的符合性时,通常需要三重冗余点火源防护设计。但是 FAA 发现,对于一些由闪电引起的点火源防护,三重冗余一般都是不现实的,申请人往往采用豁免或专用条件表明 25.981(a)(3) 条款的符合性。而这些豁免情况的处理给适航局和行业带来了许多不便。并且,FAA 也认为燃油箱系统通常的闪电防护也是合理有效的。146 号修正案中将闪电导致的点火源分析从 25.981(a)(3) 条款中移至 25.954 条款^[3]。

在经历了燃油箱防爆和闪电防护条款的演变之后^[4],在本次对 FAR 25.954 的修改中,建立了基于性能标准的关于“关键闪电”和“燃油系统”的定义,并要求由于闪电以及受其影响相关造成的灾难性的燃油蒸气点火是完全不可能事件;并要求申请人将适航限制加入到飞机的持续适航文件(ICA)中以防止由闪电造成燃油蒸气点火事件的发生。

FAR 25.954 燃油系统点火源防护:

(a) 燃油系统的设计和布局,必须防止由于下列原因而点燃系统内的燃油蒸气:

(1) 关键闪电是:该闪电击中飞机某个部位,如果再遇到任何设计特征和结构失效,就会产生点火源;

(2) 燃油系统是燃油箱结构和燃油箱系统内的任何部件,以及任何穿过燃油箱壁面、连接或在燃油箱内部的燃油结构和系统部件。

(b) 燃油系统的安装和设计必须防止由于闪电及其效应造成灾难性的燃油蒸气点火。主要类型包括:

- (1) 闪电附着概率高的区域直接被闪击;
- (2) 扫掠闪电可能性高的区域被扫掠闪电;
- (3) 闪电或者电瞬态引起的燃油点火。

(c) 为了遵守本条的(b),使得灾难性的燃油蒸气点火完全不可能发生,必须考虑到可燃性,关键闪电以及燃油系统内部的失效。

(d) 防止由于闪电造成灾难性的燃油蒸气点火,型号设计必须包含关键设计构型控制限制(CDCCL),从而识别这些特征,保护这些特征,还需要包含检验和测试程序、检验和测试的时间间隔、以及用以说明对(b)的符合性的这些设计特征的强制更换时间,按照 25.1529 的要求,申请人必须在持续适航文件(ICA)的适航限制部分(ALS)中包含这些内容。

2 燃油箱系统闪电防护分析思路

根据 FAR 25.954 条款的要求,需确保灾难性燃油蒸气点燃事件的概率为极不可能。在闪电防护设计时,尽量避免燃油箱系统接近点火源,同时考虑所有可能含有燃油蒸汽的地方。燃油箱系统通过一系列专用防护设备或特定技术来进行闪电防护设计(AC20-53B 推荐方法)^[5]。

根据 AC25.954-1,将燃油箱系统闪电防护设计特征分为固有安全、容错和非容错三大类^[6]。针对这三种不同的设计特征,燃油箱系统闪电防护分析思路如图 1 所示。

主要工作包含:

1) 识别出所有需要进行闪电评估的设计特征和要素。如暴露于闪电直接附着和扫掠的结构件和紧固件,暴露于闪电直接附着或传导电流的通气口、加油口等零部件,在油箱内受传导电流影响的燃油设备、液压设备和管路等。

2) 识别防护特征的潜在失效。需通过详细审查制造过程、材料性能、结构设计、系统设计、可靠性和可维护性过程,识别潜在失效。潜在失效也包含材料腐蚀、老化、磨损或疲劳导致的问题。可参考 SAE ARP5414^[7]确定的飞机闪电分区对特征的失效状态以及产生的点火源类型进行判断,点火源的类型可参考 AC25.981-1D^[8]。

3) 判断设计特征是否为固有安全设计。通过分析证明其设计特征为本质有效的,不会出现可能产生点火源的失效或失效组合。

4) 确定防护特征的容错性或非容错性。当发生单一失效再加上临界雷击进而产生点火源的,认为是非容错防护设计。两重防护设计为容错设计。

5) 针对容错设计,考虑到燃油箱系统遭受闪电附着或传导电流的概率微小,且已采用了两重防护,如果容错闪电防护特征经证明有效可靠,可无需进一步分析失效概率。

6) 针对非容错设计(通常只有燃油箱结构会采用非容错闪电防护设计,燃油、液压和电气部件等通常可设置容错设计),通过证明雷击和燃油箱可燃状态造成灾难性燃油蒸气点燃的可能性为极不可能来表明符合性。依据 AC25.954-1,可通过定性分析或定量分析法,如不能证明,需纠正改进或增加额外防护。

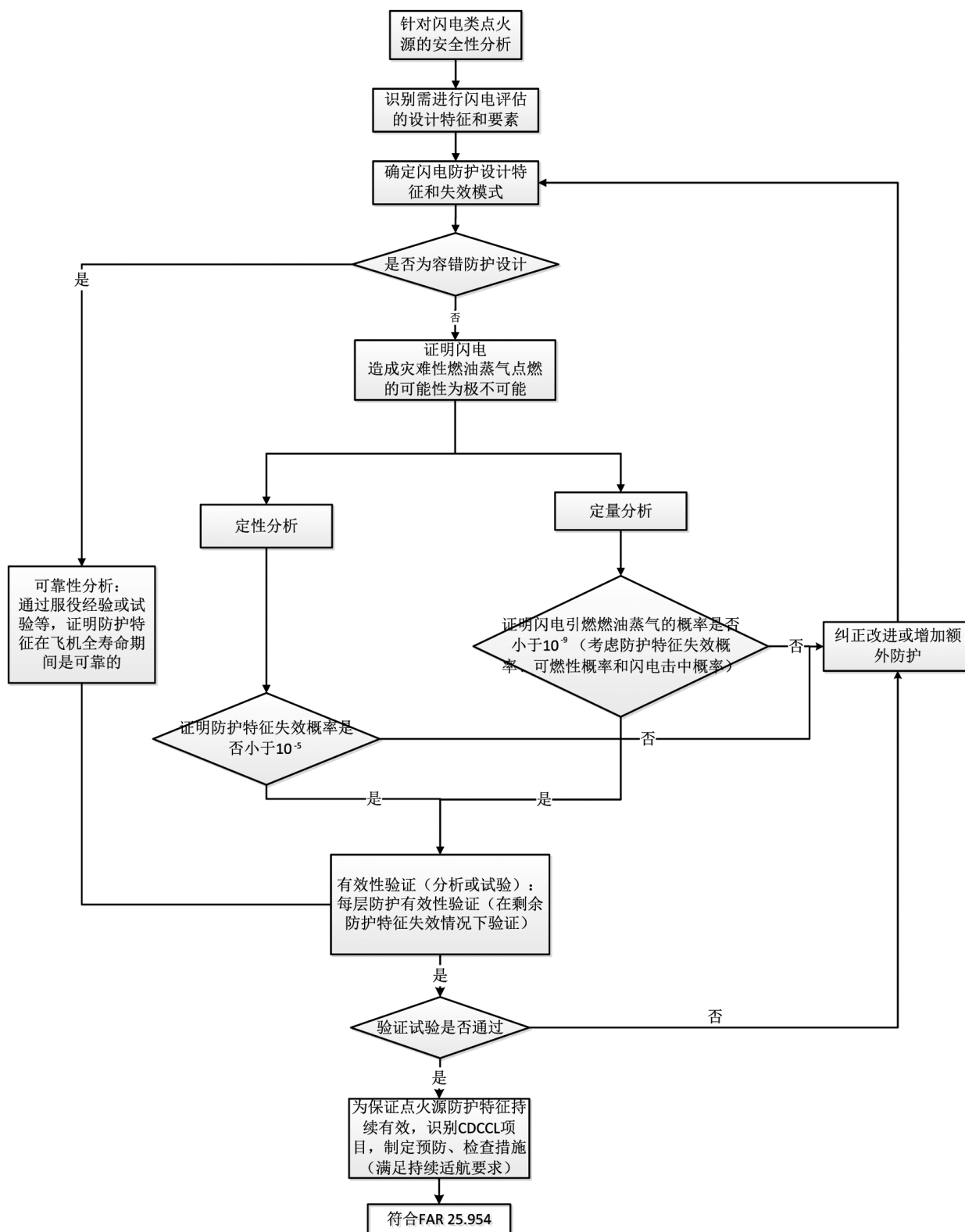


图 1 燃油箱系统闪电防护分析思路图

7) 证明防护特征的有效性。根据闪电环境定义的电流振幅和波形对识别的失效情况进行有效性验证。闪电环境定义可参考 SAE ARP5412。

8) 当定量分析或定性分析,以及有效性验证都不能满足要求时,需纠正改进或增加额外防护措施,然后重新开展防护分析工作。

9) 针对闪电防护特征,为确保不会在维护、修理或改装中无意见违反燃油箱系统设计的完整性和有效性,将其制定为 CDCCL 进行持续管理。

3 闪电防护分析详细说明

3.1 固有安全设计

部分燃油箱系统设计特征自身就提供了有效的闪电防护作用,无可致其失效的可预见的失效模式。由于在该设计特征中经过的电流或电压较低,可确认其为固有安全设计,如:

1) 燃油箱结构内的紧固件或接头,由于电流密度较低,即使存在失效情况也不会产生点火源;

2) 对于高导电性燃油箱蒙皮,提供足够厚度以确保蒙皮在遭受闪电附着时油箱内不会产生点火源。

3.2 非容错闪电防护分析

首先尽量减少并排除采用非容错防护设计的可能性,确定是否可在不增加较多经济影响的前提下采用实际措施使其具有容错性。评估时可采用定性分析法或定量分析法,或者两者相结合。如果失效概率评估合理准确,建议采用定量评估;如果失效模式较少,且确定失效率的服役数据有效,建议采用定性评估。

3.2.1 定性分析

在定性评估时,证明非容错防护设计特征失效从而引发点火源的概率小于 $1E-5$ 。根据 AC25-19A^[9] 的定义,该类失效状态是指单架次飞机在全寿命期间内不会发生,但是在该类飞机的整个寿命期间内可能发生数次。非容错设计定性评估的分析思路如图 2 所示,主要包含以下工作。

1) 确定非容错设计特征或要素。充分考虑疲劳、磨损、制造缺陷等情况下的失效;

2) 对失效状态的发生概率进行评估;

3) 评估非容错特征附近遭受雷电附着的可能性,及其闪电电流振幅足以产生点火源的可能性。由于防护设计特征通常可以承受一定的闪电电流以

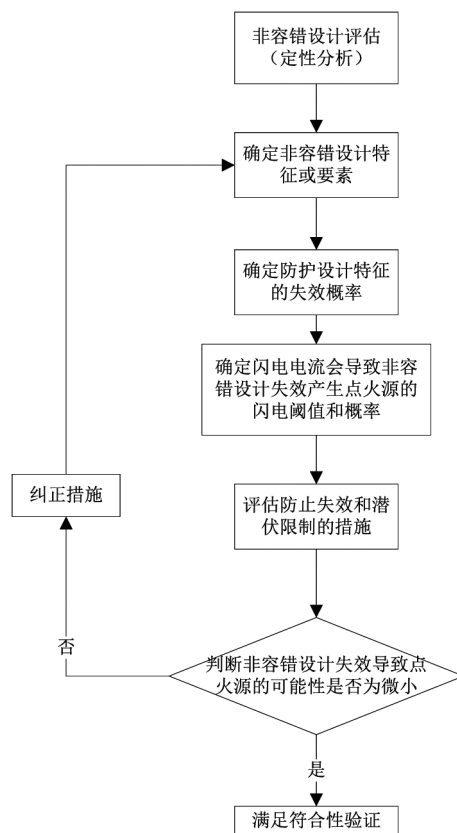


图 2 非容错设计定性分析思路图

致不产生点火源,如果超过阈值将会形成点火源。闪电特性的验证一般可通过试验法和分析法。通过对相关设计特征失效状态下进行试验,可以确定产生点火源的闪电电流振幅等参数,闪电试验方法指南可参考 SAE ARP5416^[10];

4) 充分评估防止失效的措施。如特定的检查间隔可用于检测失效;通过额外的制造控制尽可能减少生产缺陷;

5) 在设置一定的检测措施基础上,判断特征失效引起点火源的概率是否小于 $1E-5$ 。如不满足,需通过纠正措施改进设计特征。

3.2.2 定量分析

在定量评估时,证明闪电引起燃油蒸气点燃的概率为极不可能,即每飞行小时的概率小于 $1E-9$ 。要证明这一点,必须有合理可靠的失效概率数据。定量分析时,包含:

1) 燃油箱可燃性的概率。根据 25.981(b) 条款要求,每个燃油箱的机队平均可燃性暴露时间均不得超过可燃性暴露评估时间的 3%。可根据飞机惰化系统性能和燃油箱热模型通过蒙特卡罗计算该可

燃性概率^[11];

2) 非容错防护特征失效的概率。通过服役运营、试验、分析或数据库等方法获取合理可靠的失效数据;

3) 足以在失效特征上形成点火源的闪电击中概率,可通过试验室试验、仿真分析和相关数据库获得。

4 结论

依据 FAA 的 25-146 号修正案和咨询通告 AC25.954-1,解读并归纳出了民用飞机燃油箱系统闪电防护的分析思路,主要包括以下几点:

1) 识别出所有需要进行闪电评估的设计特征和要素,同时结合闪电分区和点火源类型识别防护特征的潜在失效状态;

2) 固有安全设计可通过分析或试验等方式证明其设计特征为本质有效的,不会出现可能产生点火源的失效或失效组合;

3) 针对容错类设计,考虑到可燃性和环境因素,可仅通过证明防护设计特征有效且可靠来表明符合性,无需进一步分析失效概率;

4) 针对非容错类设计,通过定性和定量分析法。在定性分析时,需评估非容错特征失效且引起点火源的概率小于 $1E-5$ 。在定量分析中,可结合燃油箱可燃性、闪电击中概率和防护特征失效概率确保闪电引起燃油蒸气点燃的概率为极不可能。

参考文献:

- [1] 张斌,宋志强,卞刚,等. 民用飞机燃油系统闪电效应研究[J]. 中国民航大学学报, 2015, 33(1): 5-8.
[2] SAE. Aircraft lightning environment and related test

waveforms;SAE ARP5412A[S]. [S.l.:s.n.], 2015.

- [3] FAA. Transport airplane fuel tank and system lightning protection;FAA-2014-1027; Amdt. No. 25-146[S]. U. S. ;Federal Aviation Administration, 2018.
[4] 张斌,岳鹏,薛勇,等. 民机燃油箱防爆闪电防护新适航要求研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(4): 31-35.
[5] FAA. Protection of aircraft fuel systems against fuel vapor ignition caused by lightning;AC20-53B[S]. U. S. ;Federal Aviation Administration, 2006.
[6] FAA. Transport airplane fuel system lightning protection;AC25.954-1[S]. U. S. ;Federal Aviation Administration, 2018.
[7] SAE. Aircraft Lightning Zoning;SAE ARP5414A[S]. [S.l.:s.n.], 2015.
[8] FAA. Fuel tank ignition source prevention guidelines; AC25.981-1D[S]. U. S. ;Federal Aviation Administration, 2018.
[9] FAA. Certification maintenance requirements; AC25-19A[S]. U. S. ; Federal Aviation Administration, 2011.
[10] SAE. Aircraft lightning test methods; SAE ARP5416[S]. [S.l.:s.n.], 2005.
[11] 郭军亮,周宇穗,王澍,等. 飞机燃油箱可燃性定量分析的燃油箱热参数计算方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(3): 20-22.

作者简介

田玉雯 女,硕士,工程师。主要研究方向:民机燃油箱防爆设计。E-mail: tianyuwen@comac.cc

张斌 男,硕士,研究员。主要研究方向:燃油箱防爆设计。E-mail: zhangbin@comac.cc

李燕 女,硕士,工程师。主要研究方向:燃油箱防爆设计。E-mail: liyan5@comac.cc

Research on the fuel tank system lightning prevention analysis method for civil aircraft

TIAN Yuwen* ZHANG Bin LI Yan

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

Abstract: Civil aircraft fuel tank system lightning prevention is an important research area of fuel tank safety. According to FAA amendment No. 25-146 and AC25.954-1, this paper introduces the fuel tank system lightning prevention analysis method. Based on the analysis method of ignition source protection, the ignition source caused by lightning can be analyzed separately through fault-tolerant design and non-fault-tolerant design after clarifying the lightning zoning of aircraft. For fault-tolerant designs, compliance can be demonstrated only by proving that the protection design features are effective and reliable, without further analysis of failure probability. For non-fault-tolerant designs, it can evaluate through by qualitative and quantitative analysis methods. In the qualitative analysis, it is necessary to evaluate that the probability of non-fault-tolerant feature failure and the ignition source is remote. In the quantitative analysis, it needs to combine the probability of the fuel tank flammability, the probability of critical lightning strikes, and the failure probability of protective features to ensure that the probability of fuel vapor ignition caused by lightning is extremely improbable. At the same time, the effectiveness of the protection design features is verified according to the current amplitude and waveform defined by the lightning environment.

Keywords: fuel tank system; lightning; ignition resource; fault-tolerant design; non-fault-tolerant design

* Corresponding author. E-mail: tianyuwen@comac.cc