

发动机反推力系统安全性设计

张艳慧, 秦 浩, 王代军

(中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院 动力燃油设计研究所, 西安 710089)

摘 要: 通过分析发动机反推力系统适航规章 25.933、相关的适航咨询通告和背景资料,以及民用飞机反推力系统空难事故,获得了反推力系统设计的总体安全性要求,为国内反推力系统的安全性设计提供了重要的指导。运用系统安全性评估的方法对某型号反推力系统的初步方案进行了分析。结果表明:系统架构设计中存在单一故障导致反推力装置意外打开,不满足反推力系统总体安全性要求。为了消除该单一故障,提出了将同步锁的控制独立于反推控制器(EAU)的更改方案。这不仅明显提高了某型号反推力系统的安全性,也对以后其他型号反推力系统的设计具有重要的借鉴意义。

关 键 词: 反推力系统; 安全性设计; 系统安全性评估; 单一故障; 同步锁

中图分类号: V228.74

文献标志码: A

Engine reverser thrust system safety design

ZHANG Yan-hui, QIN Hao, WANG Dai-jun

(Aircraft Propulsion and Fuel System Design and Research Department,
the First Aircraft Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: The overall safety requirements of reverser thrust system were attained by studying airworthiness regulation 25.933, relative airworthiness advisory circulars and background information of reverser thrust system, combining reverser thrust system accident of civil aircraft. These offer useful instructions for improving the safety of reverser thrust systems. A aircraft's reverser thrust system preliminary scheme was assessed by using of system safety assessment method. Results indicate that system architecture don't meet safety requirements, there is a single failure in the system architecture which can lead to thrust reverser device accidentally opened. To eliminate the single failure, the scheme of sync lock control would be isolated from the engine accessory unit (EAU) was proposed, which not only evidently improve the safety of the reverser thrust system of a type aircraft, but also provide important instructions for designing the reverser thrust system on other type aircrafts.

Key words: reverser thrust system; safety design; system safety assessment;
single failure; sync lock

随着航空技术的发展,绝大部分大型运输机均采用了反推力装置来缩短着陆滑跑距离。反推力装置可以显著缩短着陆滑跑距离,尤其是在潮湿和结冰跑道上的作用尤为突出,并可以用于紧急中断起飞,还可以提高飞机的机动性能,保证飞

机在应急状态下安全、迅速、准确的着陆,因此反推力装置在运输机上得到了广泛的应用^[1-10]。

反推力系统是一个特殊的系统,它既是飞机的系统,在适航规章 25 部中对其设计有明确的要求^[11-12],同时它又是发动机的系统,并且在很多飞

机上,反推力系统都是由发动机承制方负责研制的.反推力系统的设计的好坏直接影响飞机的安全,历史上已经发生过两起由于反推力系统故障导致飞机坠毁的事故.因此,反推力系统的安全性设计至关重要,直接关系到飞机的安全,飞机承制方必须重视.

1 系统安全性方法简介

系统安全性评估(system safety assessment, SSA)是以得到证明的科学原理为基础的正统工程学科;与任何工程原理相同,SSA 使用逻辑思考的方法.使用适当时,该方法将是系统的和彻底的;SSA 是一个综合性的分析方法,并且该方法被称之为系统工程.

在飞机研制的整个过程中,安全性工作并不

是一个环节,而是一个持续不断的过程.它与具体设计工作同步开始,同步推进,相互影响,同时得出最终结果.系统安全性分析过程主要包括功能危险评估(functional hazard assessment, FHA)、初步系统安全性评估(preliminary system safety assessment, PSSA)、系统安全性评估(SSA)、共因分析(common cause analysis, CCA),所采用的主要方法包括功能危险评估、故障模式与影响分析(FMEA)、故障树分析、共因分析^[13-15].系统安全性评估过程与时机见图 1.

要完成系统安全性设计,需掌握以下 4 种安全性设计方法:①功能危险评估:制定安全性设计标准;②故障模式及其影响分析:寻找单故障和潜在故障;③故障树分析:用数量表示组合故障;④共因分析:寻找冗余违犯者.

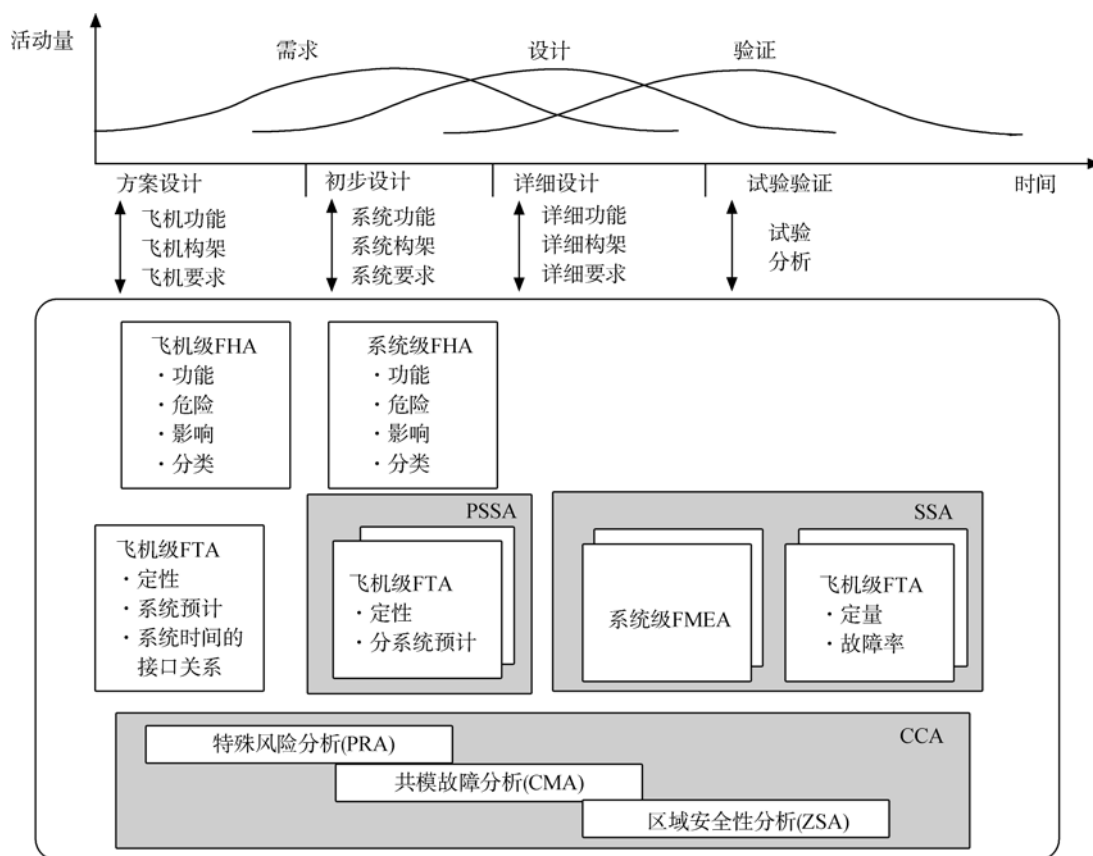


图 1 系统安全性评估过程与时机

Fig. 1 System safety assessment process and opportunity

2 反推力系统的安全性设计要求

历史上主要发生了两起反推力系统空难事故,一起是 1978 年的波音 737-275 反推力系统空难事故,另一起是 1991 年波音 767-329ER 反推

力系统空难事故.

在 1991 年劳达反推力系统空难事故之前,反推力系统均是两锁系统,该事故之后,波音和空客民用客机的反推力系统均改为“三锁”系统.该事故催生了反推力系统适航指导材料 AC25.933 草

案和 AC25.1309-1B,以及 AMC25.933.

2.1 空中反推力装置意外打开案例分析

2.1.1 波音 737 飞机事故分析

1978年2月11日,一架波音737-275飞机接地后复飞,飞机爬升到300~400ft(1ft=0.3048m)后严重向左倾斜,失去高度并向左侧滑坠地,飞机解体并起火^[14].

根据事故调查结果,飞行员在飞机接地后打开反推力装置进行减速,突然发现跑道上的扫雪机,立即启动复飞程序,但是由于飞机升空时液压动力自动切断,这时左侧发动机反推力装置没有完全收回,在气动力的作用下完全打开.这使得一台发动机处于起飞推力,另一台发动机处于慢车反推力,飞机低速、高阻力飞行导致飞行员失去对飞机的控制,飞机坠毁.图2是波音737-275的反推力装置的结构形式.

事故调查结果表明,该事故主要是由飞行员误操作和机场管理混乱引起的,另一方面,也是由于波音737飞机设计时没有考虑反推力装置打开后又中断着陆的可能性.



图2 波音737-275飞机反推力装置

Fig.2 Reverser thrust device of Boeing 737-275 aircraft

2.1.2 波音 767 飞机事故分析

1991年5月26日,泰国劳达航空公司一架波音767-329ER飞机爬升时由于左侧发动机反推力装置非指令打开,导致飞机失去控制并坠毁^[16-17].

1991年劳达波音767反推力系统空难事故引起了工业界的广泛关注,在该次空难以前,发生了很多反推力装置空中打开的事件,但是并没有揭示出反推力装置意外打开会严重地影响飞机的操纵性.基于服役经验,反推力系统的适航规章主要集中在起飞和着陆阶段保证反推力装置不会意外打开,因为人们普遍认为在这两个阶段反推力装置意外打开是灾难性的.劳达波音767反推力

系统空难事故揭示了在高速高功率状态,反推力装置打开对飞机操纵性有着严重的影响.

波音767飞机的反推力系统是一个“两锁”系统,事故分析结果表明“两锁”反推力系统的安全性是不够的,需设置第3道锁来防止空中反推力装置意外打开.1994年2月24日,美国联邦航空局(FAA)颁布了AD94-12-10要求波音公司的波音767飞机设计同步锁系统.继波音767之后,波音其他的所有飞机均要求按照AD94-12-10设计第3道锁系统.

2.2 适航规章及相关背景资料

适航规章25部条款25.933,25.901c和25.1309三个条款^[11],均对反推力系统的安全性提出了要求.

1991年劳达波音767反推力系统空难事故引起了工业界的广泛关注,FAA和航空工业协会(AIA)成立了筹划委员会,对以前已经审定合格的运输类飞机机队进行安全检查,并制定机队评估标准.美国航空规章协调委员会根据FAA的要求拟定了AC25.933草案.虽然目前没有看到正式的AC25.933颁布,但是欧洲适航局正式出版的适航指导资料AMC25.933与AC25.933草案的内容是相同的.

AMC25.933给出了仅在地面使用的反推力系统的符合性方法.文中,定义了导致反推力装置空中意外打开的“故障条件”,通过故障树阐述了“故障条件”的含义,见图3.文中明确指出,不能只有一个“故障条件”导致反推力装置空中意外打开.对于有两个“故障条件”导致反推力装置空中意外打开的情形,任何一个故障条件均不能存在超过一个飞行架次.对于3个“故障条件”导致反推力装置空中意外打开的情况,要求限制超过一个飞行架次的“故障条件”的暴露时间.文中明确要求该故障条件总的发生概率要小于等于 10^{-3} /飞行小时,这就限制了相应故障条件的暴露时间.

2.3 安全性设计要求

根据适航规章25部、适航指导材料AC25.1309-1A,AMC25.1309,AMC25.933和条款25.933相关的适航背景资料^[18],以及1991年劳达波音767反推力系统空难事故后民用客机的设计经验,总结出反推力系统的安全性总体设计要求:

1) 不能有单一故障导致反推力装置空中意外打开.

2) 存在一个潜在故障的条件下,仍然不能有

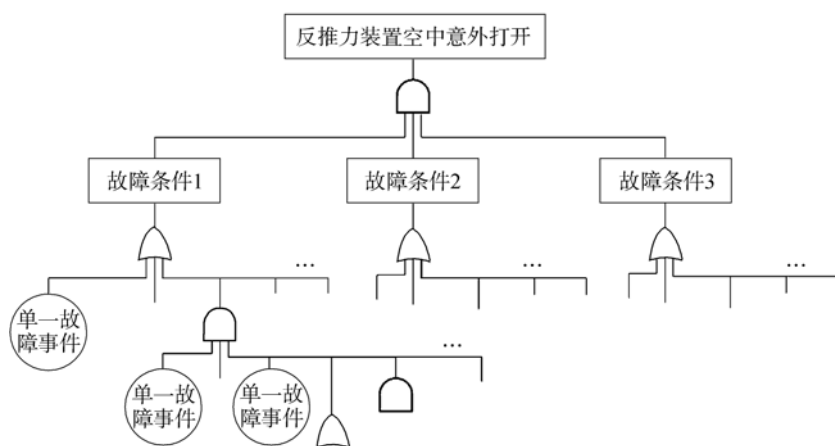


图 3 反推力意外打开故障条件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fault conditions of reverser thrust device accidentally opened in the air

单一故障导致反推力装置空中意外打开,且事件发生概率要小于 10^{-6} /飞行小时。

3) 设计 3 道锁是反推力系统的通用设计,且第 3 道锁要与其余两道锁物理隔离。

3 某型号反推力系统安全性设计分析

3.1 某型号反推力系统方案概述

某型号反推力装置采用叶栅式,分为左右两半。反推力液压作动系统由一个液压控制活门、两个滑动半罩、6 个液压作动筒、2 道同步锁以及 6 个接近开关信号等零部件组成。液压控制活门由准备、展开和收回 3 个电磁阀组成。

反推控制器(EAU)接收油门杆开关组件的展开或收回指令信号,以及飞机送来的空地信号,控制反推力装置的打开和收回。同时采集液压控制活门、同步锁和反推整流罩的接近开关的信号等,综合各接近开关信号以及同步锁的电压、电流等,监控反推力系统状态,进行座舱指示、故障诊断及告警。

3.2 某型号反推力系统安全性分析

根据系统安全性分析要求,在系统初步方案阶段,主要对系统进行功能危险评估(FHA)和初步系统安全性评估(PSSA),通过 FHA 确定系统的安全性总的要求,通过 PSSA 将系统的安全性要求分解到分系统和设备,并对系统的初步架构进行一轮评估,找出系统架构设计中的安全隐患,优化系统的架构设计。

对反推力系统进行初步 FHA,表 1 是反推力系统灾难性功能危险摘要表。根据表 1 可知反推力装置空中意外打开是灾难性的失效状态。

表 1 灾难性功能危险摘要表

Table 1 Summary list of catastrophic functional hazard

功能危险编号	功能危险描述	危险等级	验证方法
71-E-1	反推力装置 空中意外打开	I	CCA,FTA, FMEA

根据目前某型号反推力系统的设计方案,系统设有两个机械锁将反推力装置锁定在关闭位置,一个是同步锁,另一个是作动筒锁。从电气和液压方面,设有准备电磁阀和展开电磁阀,只有展开电磁阀和准备电磁阀均通电时,液压才能供给作动筒打开端。

根据上述描述,反推力系统看起来好像有 3 道防线防止反推力装置空中意外打开。下面通过系统的 PSSA,确认系统是否有 3 道防线,检查系统的设计架构是否满足安全性要求,同时将系统安全性要求分配到下一级子系统或设备。主要采用了 FTA 和 CMA 两种分析方法。

图 4 是反推力装置空中意外打开的故障树,图中 Q 代表不可靠度,括号中数据表示分配的故障率。从图中可以明确看出,每个防线都满足分配的安全性要求,但是由于 EAU 的共模故障,顶事件不满足安全性要求。因此,系统从架构设计上存在单一故障导致反推力装置意外打开,这不满足反推力系统的总体安全性要求。

表 2 是共模分析(CMA)结果摘要表,共模分析结果表明,系统存在一个共模错误,采用了同一个硬件来控制反推力系统的 3 道锁,使得一旦硬件发生共模故障,可能会导致 3 道锁全部解锁,反推力装置意外打开。根据灾难的失效状态独立性要求,冗余架构之间不允许使用同一个硬

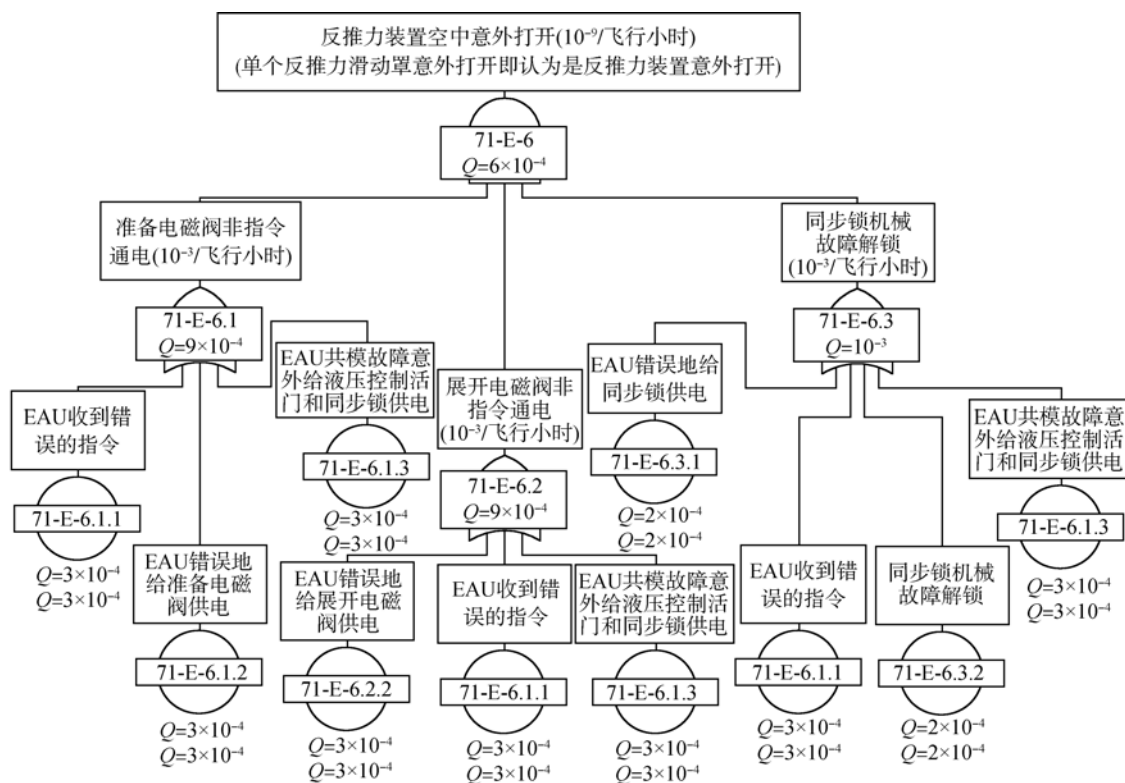


图 4 反推力装置空中意外打开故障树

Fig. 4 Failure tree of reverser thrust device accidentally opened in the air

表 2 共模分析结果摘要表

Table 2 Summary list of CMA result

功能危险 编号及 描述	危险 等级	故障树 编号	与门编号 和名称	独立性 要求	存在共模			
					共模 来源	共模故 障/错 误描述	是否 可接受	可接受情况说明 及不可接受情况 建议措施
71-E-6, 反推力 装置空中 意外打开	灾难的	71-E-6	71-E-6, 反推力 装置空中 意外打开	准备电磁阀、 展开电磁阀和 同步锁供电 要相互独立	共用 部件	硬件错误, 导致 3 个 电磁阀 同时通电	否	至少有 1 个电磁阀 的供电与其余 2 个 电磁阀相互独立

件,因此该共模是不可接受的,需要更改系统架构设计。

另外,根据使用经验来说明该共模也是不可接受的。下面就波音和空客民用飞机的使用经验来进行说明。

首先看波音 737-NG 飞机,该飞机的反推力装置是叶栅式的。图 5 是波音 737 飞机反推力装置打开控制框图。从图 5 可以看出,为了防止反推力装置在空中打开,系统设有 3 道锁,且有一个完全独立的第 3 道锁。第 1 道锁是液压隔离阀,将飞机液压系统的液压隔离在反推力系统之外;第 2 道锁为方向控制阀,控制反推力系统的液压方向;

第 3 道锁为同步锁,机械地将反推滑动罩锁定在收回位置。

某型号反推力系统的设计与波音 737-NG 飞机相似,反推力系统的控制均不经过发动机控制器(EEC),均设有一个反推控制器(EAU)。但是两者最大的不同是,波音 737 飞机的 EAU 不控制反推力装置的打开,主要控制反推力装置的收回和自动收回以及反推力系统的指示和故障告警。而某型号的反推力系统将其全部控制功能集中在 EAU 内,使得反推力系统的 3 道防线丧失了独立性。

再看一下最新的波音 787,其反推力装置也

是叶栅式的,由发动机数字电子控制器进行控制。为防止反推力装置在空中意外打开,系统也设有 3 道防线,见图 6。从图 6 可以看出,系统有一个完全独立的第 3 道锁。ARJ21-700 飞机的反推力控制及安全防护系统的架构设计和波音 787 基本一样,也有一个完全独立的第 3 道锁。

空中客车 A320 系列飞机(配装 V2500 发动机)的反推力装置也是叶栅式的,由发动机数字电子控制器进行控制。为了防止反推力装置空中意外打开,系统设有 3 道防线,见图 7。

综上所述,不管是空中客车公司还是波音公司的飞机,其反推力系统的 3 道防线均是相互独立的,没有哪种类型飞机反推力系统的控制完全由控制器实现,不管是采用 EEC 作为控制设备,还是采用专门的 EAU,都至少有一道防线完全独立于控制器。因此,根据民机的经验,该共模仍然是不可接受的。因此,目前某型号的反推力系统方

案既不满足安全性设计的要求,又没有成熟可借鉴的服役经验,所以,方案的更改势在必行。

3.3 系统架构更改建议

根据系统安全性分析的结果,某型号反推力系统方案需要更改。针对目前某型号的反推力系统的方案,提出以下更改建议:3 道锁中至少有 1 道锁要独立于 EAU,参考民机的反推力系统设计,将同步锁的控制独立于 EAU。由油门台的微动开关和 1 个单独的继电器或者另外一个设备来控制。除了将同步锁的控制独立于 EAU 外,展开电磁阀的供电串联一路控制命令,该控制命令由油门台微动开关提供,这样 3 道锁的控制就相互独立了。

对上述方案进行系统安全性分析,故障树见图 8。从图 8 可以看出,系统架构更改后,分配给子系统和设备基本相同的安全性指标,可以满足系统安全性要求。因此,虽然更改后的方案也存在

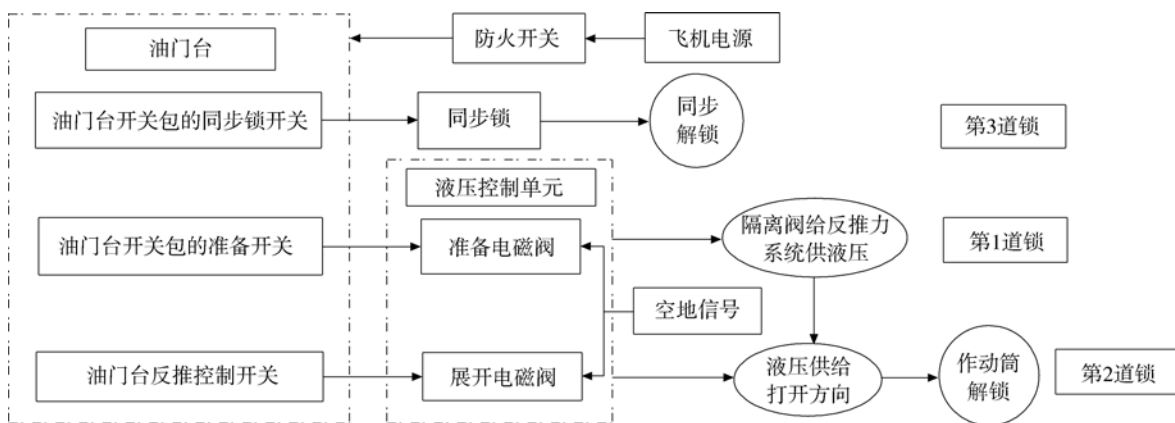


图 5 波音 737 飞机反推力装置打开控制框图

Fig. 5 Control block diagram of reverser thrust device opened of Boeing 737 aircraft

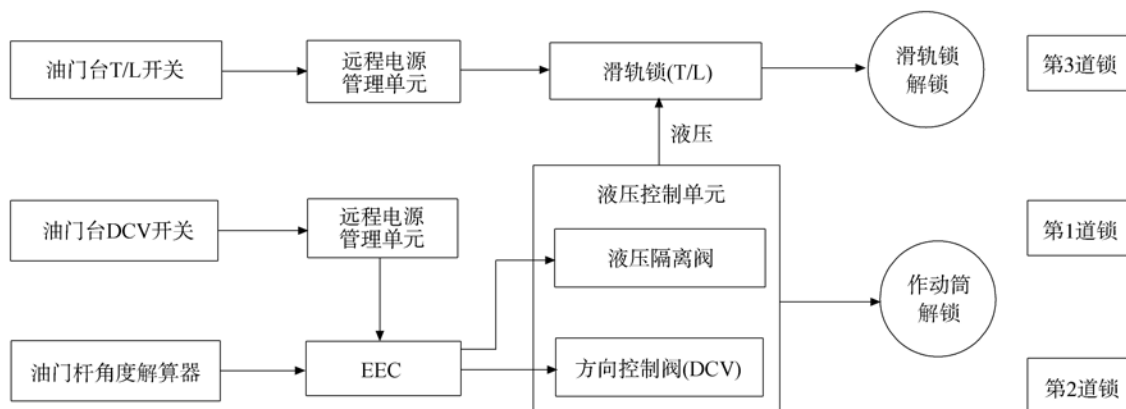


图 6 波音 787 飞机反推力装置打开控制框图

Fig. 6 Control block diagram of reverser thrust device opened of Boeing 787 aircraft

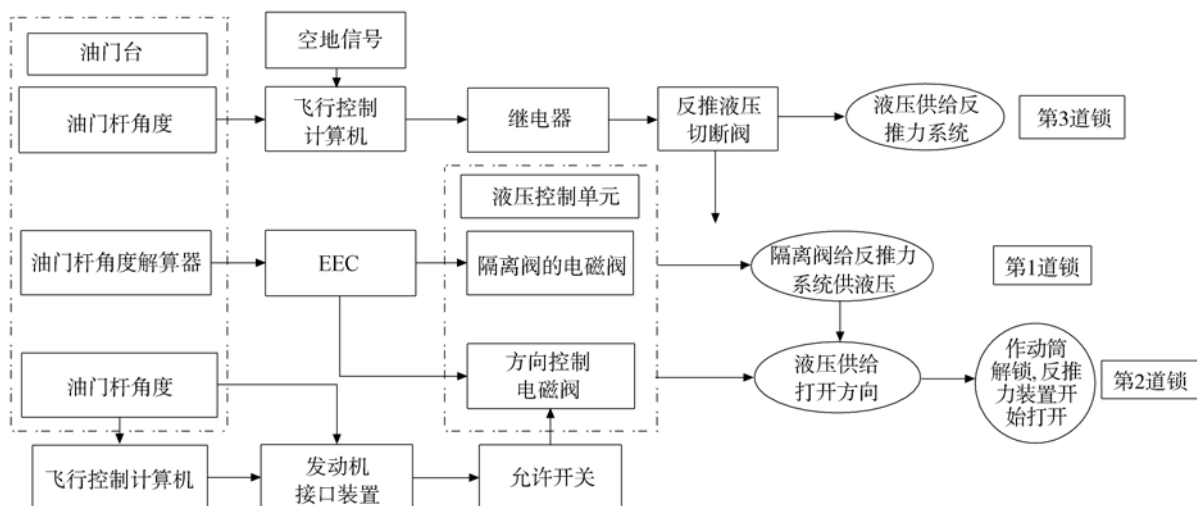


图7 A320飞机反推力装置打开控制框图

Fig. 7 Control block diagram of reverser thrust device opened of A320 aircraft

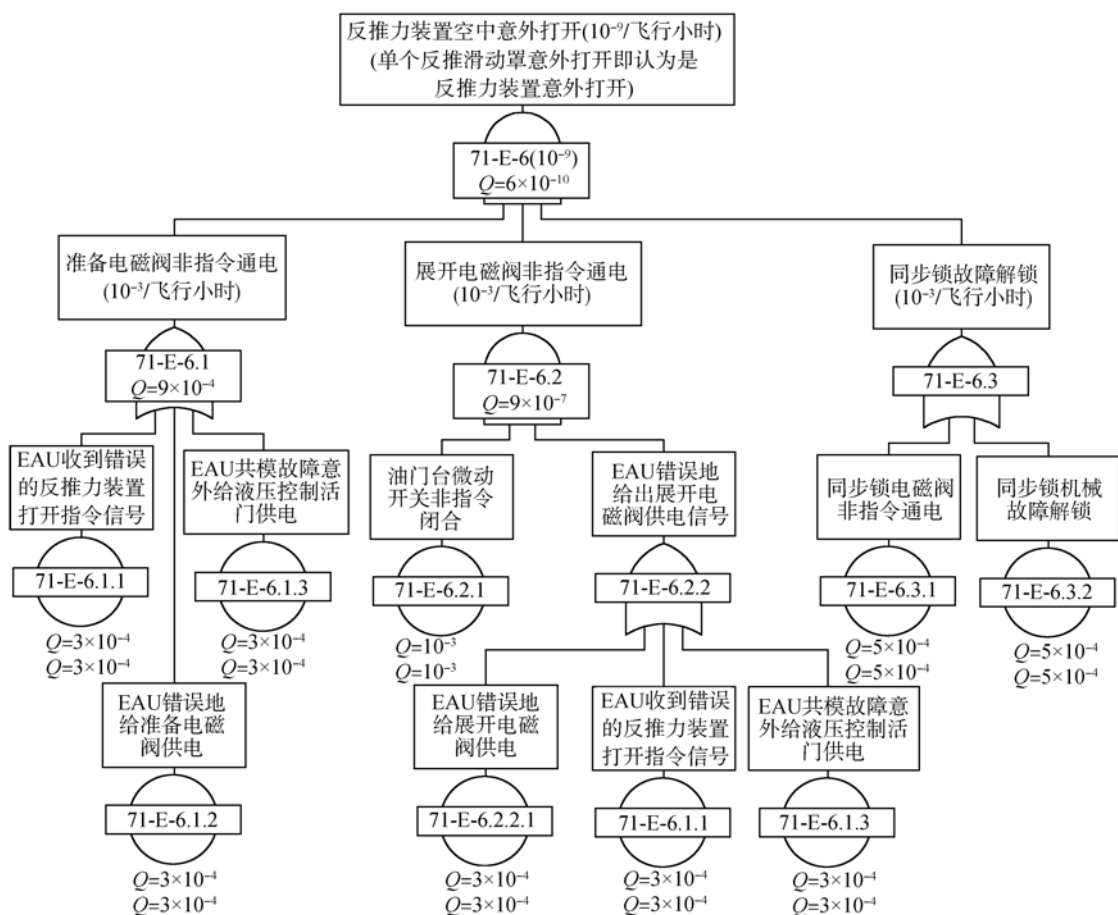


图8 更改后的方案对应的故障树

Fig. 8 Failure tree of plan after improving

共模故障/错误,但是由于其有一个完全独立的第3道锁,其共模故障/错误是可接受的,且民机中也存在类似的共模.因此该更改后的方案满足系统安全性设计要求.

4 反推力系统安全性设计特征

上文主要是针对反推力系统架构设计的安全性进行分析,本节就反推力系统主要控制部件以

及各部件的工作时序的安全性要素展开分析。

4.1 反推力系统各部件的安全性设计特征

反推力系统各部件的主要安全性设计特征如下:

1) 反推力系统部件的设计要考虑反推力系统发生卡滞时所承受的载荷,当反推滑动罩在运动过程中发生卡滞时,不能损坏机械锁定装置。

2) 系统的任何一个机械锁都要能承受整个系统的最大载荷(包含叶片飞出和系统卡滞)。

3) 系统的任何一道锁,都不是仅依赖一种能源。例如,波音787飞机的整流罩锁,需要电源和液压源两种能源才能解锁。

4) 机械锁的布置需要考虑发动机非包容转子爆破的影响,不能将其布置在同一个发动机非包容转子爆破平面内,否则会被同一个碎片击中。

5) 设计反推禁用措施,使得在反推力系统发生单一故障时可以安全派遣。大部分飞机均是在液压隔离阀上设计反推禁用措施,同时还在反推滑动罩上设有禁用结构。

6) 机械锁的结构设计需要保证,解锁时要无载荷释放,锁定时要无载荷锁定。同时各机械锁的设计需仔细考虑其载荷失效路径的可探测性,使其发生隐蔽故障的可能性降至最小。

7) 同步轴与作动筒的啮合量要足够,否则容易导致磨损。

4.2 系统各部件工作时序安全性设计特征

反推力装置展开对应各部件的工作时序一方面为了保证反推力装置空中意外打开的安全性,另一方面是为了保证各部件无载荷释放,即各机械锁解锁时均不承受额外的应力。对于波音737-600系列飞机,通过一个延时继电器实现,同步锁通电0.1s后准备电磁阀和展开电磁阀通电,以保证液压供给作动筒时,同步锁已经解锁。

反推力装置收回时,各部件的工作时序是为了保证反推力装置可以正常收回,同时保证收回后各部件收回到锁定位置时处于无载荷状态。例如波音737-NG系列飞机,通过时间延时继电器实现各部件的断电先后顺序,反推开始收回10.5s后,准备电磁阀和收回电磁阀断电,18s后同步锁断电。A319飞机是在反推力装置完全收回5s后,隔离电磁阀断电。

综上所述,虽然不同的飞机各部件工作时序的实现方法有所不同,但是,都有一个共同的目的,就是确保各部件无载荷释放,以及重新处于锁

定状态时无额外的应力,以保证各部件工作的安全可靠。

5 结 论

通过对反推力系统相关的适航规章、咨询通告和相关的适航背景资料的研究,以及反推力系统空难的分析,获得了反推力系统的总体安全性设计要求如下:

1) 不能有单一故障导致反推力装置空中意外打开。

2) 存在一个潜在故障的条件下,仍然不能有单故障导致反推力装置空中意外打开,且事件发生概率要小于 10^{-6} /飞行小时。

3) 系统需设计一个完全独立的第3道锁,该锁需与其余两锁物理隔离。

运用系统安全性分析的方法,对某型号反推力系统进行了安全性分析,识别出了系统设计中存在的安全隐患。根据总体安全性设计要求,提出了将同步锁的控制独立于反推控制器的更改方案,提高了反推力系统设计的安全性。同时这也对以后其他型号反推力系统的设计具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 杜刚,金捷.大型运输机反推力装置[R].广东深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会,2007.
- [2] 王玉新.飞机发动机反推力装置的创新设计[R].广东深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会,2007.
- [3] 邵万仁,叶留增,沈锡钢,等.反推力装置关键技术及技术途径初步探讨[R].广东深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会,2007.
- [4] 沙江,徐惊雷.发动机反推力装置及其研究进展[R].深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会,2007.
- [5] Asbury S, Yetter J. Static performance of six innovative thrust reverser concepts for subsonic transport application [R]. NASA-TM-210300, 2000.
- [6] Yetter J. Why do airlines want and use thrust reverser? [R]. NASA-TM-109158, 1995.
- [7] McKay B, Barlow A. The ultra fan engine and aircraft based thrust reversing[R]. Atlanta, Georgia: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2012.
- [8] Mahmood T, Jackson A. Thrust reverser for a mixed exhaust high bypass ratio turbofan engine and its effect on aircraft and engine performance[R]. San Diego, California: 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Confer-

- ence and Exhibit, 2011.
- [9] 靳宝林, 邢伟红, 刘殿春. 飞机/发动机推进系统反推力装置[J]. 航空发动机, 2004, 30(4): 48-58.
- JIN Baolin, XING Weihong, LIU Dianchun. Thrust reverser of aircraft/engine propulsion system[J]. Aeroengine, 2004, 30(4): 48-58. (in Chinese)
- [10] 尹树悦, 杨云, 苗学问, 等. 基于 SysML 的反推力系统安全性分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 498-504.
- YIN Shuyue, YANG Yun, MIAO Xuewen, et al. SysML-based safety analysis of thrust reverser[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 498-504. (in Chinese)
- [11] 中国民用航空总局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2011: 102-103.
- [12] European Aviation Safety Agency. Certification specifications for large aeroplanes CS-25[R]. Cologne, Germany: European Aviation Safety Agency, 2007.
- [13] Society of Automotive Engineers. SAE ARP 4761 guidelines and methods for conducting the safety assessment process on airborne systems and equipments[R]. Warrendale, US: The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 1996.
- [14] Society of Automotive Engineers. SAE ARP 4754 guidelines for development of civil aircraft and systems[R]. Warrendale, US: The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 2010.
- [15] 克里津格. 飞机系统安全性[M]. 唐长红, 百康明, 刘存喜, 等, 译. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [16] 刘选民, 李凡. 大中型运输机飞行事故[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
- [17] Federal Aviation Administration. Lauda 767 near Bangkok, Thailand[EB/OL]. [1991-05-26]. http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=3&CategoryID=4&LLID=34.
- [18] 白杰. 运输类飞机适航要求解读: 第4卷 动力装置[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.

(编辑: 王碧琚)