

文章编号: 1674-8190(2021)01-064-08

民用飞机着陆系统安全性评估的故障树分析

张辉, 陈世浩

(中电科柯林斯航空电子有限公司 工程部, 成都 611731)

摘要: 飞机着陆系统是保障飞机安全进近着陆的关键系统, 如何评估着陆系统满足安全性设计要求的系统是系统设计的重要环节之一。阐述民用飞机安全性评估的基本流程, 以微波着陆系统为例, 针对给定的微波着陆系统框图, 通过故障树分析方法, 对完全丧失两侧微波着陆信息的失效状态进行定量评估, 重点详述建树过程和建树方法。结果表明: 故障树分析对系统架构的设计具有重要的指导作用, 二者紧密结合、相互反馈; 特别是当失效状态所对应的概率要求无法满足时, 借助故障树分析产生的割集报告, 能找出系统架构存在的薄弱之处和关键部位, 从而采取有效的应对措施, 完成对系统架构的优化设计。

关键词: 系统安全性; 故障树分析; 割集; 微波着陆系统; 架构设计

中图分类号: V215.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fault Tree Analysis for Safety Assessment of Civil Aircraft Landing System

ZHANG Hui, CHEN Shihao

(Engineering Department, Rockwell Collins CETC Avionics Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Aircraft landing system is the critical system to ensure the safe approach and landing of aircraft, and how to evaluate the landing system to meet the safety design requirements is one of the important parts of the system design. The basic process of the safety assessment for the civil aircraft is described. Taking the microwave landing system (MLS) as an example, for a given MLS block diagram, the failure condition of complete loss of both sides MLS information is evaluated by the fault tree analysis (FTA) method. The process and method of tree modeling are described in detail. The results show that FTA plays an important role in the design of the system architecture. The FTA and system architecture design are closely combined and feedback each other. Especially when the probability requirements associated with the failure condition cannot be met, the FTA cutset report can find the weaknesses and key parts of the system architecture, so as to take effective measures to complete the optimization design of the system architecture.

Key words: system safety; fault tree analysis; cutset; microwave landing system; architecture design

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-06-23

通信作者: 张辉, jackzhangh@126.com

引用格式: 张辉, 陈世浩. 民用飞机着陆系统安全性评估的故障树分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 64-71, 90.

ZHANG Hui, CHEN Shihao. Fault tree analysis for safety assessment of civil aircraft landing system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 64-71, 90. (in Chinese)

0 引言

飞机着陆系统能够向飞行员提供精密引导信息,保障飞机安全进近和着陆。一旦着陆引导信息丢失,尤其是在气象条件恶劣和能见度差的条件下,将大幅增加飞行员的工作负担,影响飞机的飞行安全。据统计,飞机的飞行事故大约有一半发生在进近着陆阶段,因此,研究飞机着陆系统的安全性设计对飞行安全具有重要意义。

仪表着陆系统(Instrument Landing System, 简称 ILS)是国际民航组织认可的标准着陆设备,过去几十年来在飞机进场着陆中发挥了很大的作用。相比于 ILS,微波着陆系统(Microwave Landing System, 简称 MLS)具有抗干扰能力强、工作波道多、能达到Ⅲ类精密进场着陆等优点,但由于种种限制,如 MLS 地面设备昂贵、ILS 已遍布全球等,目前只有少数机场使用了 MLS^[1]。2007 年 11 月,空客 A320 系列飞机获得欧洲航空安全局批准采用 MLS 进行Ⅲ类 b 盲降。新一代着陆系统是基于 GBAS (Ground-Based Augmentation Systems)的卫星着陆系统(GBAS Landing System, 简称 GLS),它通过机载设备接收卫星信号来确定飞机的大致位置,同时接收地面设备广播的误差信息,对该位置进行校正,得到飞机更精确的位置,从而支持 GLS 着陆。目前,美国及欧洲部分国家的一些机场已实施 GLS I 类运行,Ⅱ、Ⅲ类运行正在发展和取证中。中国民航于 2015 年 4 月在上海浦东机场完成了国内首次 GLS 演示验证飞行。鉴于中国正在发展可覆盖全球的北斗卫星定位导航系统,基于北斗系统的 GLS 系统是未来的发展方向^[2-3]。

安全性分析作为民用飞机研制过程中必不可少的一部分,贯穿整个研制周期^[4]。而安全性分析过程和研制过程又是紧密结合的,二者的关系遵循 ARP4754A 中提出的“双 V”过程^[5]。安全性评估的结果能对系统架构提出改进措施,直到系统设计满足适航安全性要求。

在系统安全性分析中,故障树分析方法作为安全性概率分析方法之一,在工程中应用广泛。例如,王栋^[6]将动态故障树分析方法应用于辅助动力

装置 APU(Auxiliary Power Unit)系统的分析中,可以呈现冗余系统的动态特性;王小辉等^[7]应用故障树分析方法,对结冰探测系统中丧失结冰探测告警与指示功能故障进行分析,为结冰探测系统的设计提供了参考;陆峥等^[8]通过构建故障树模型,对蓄意坠机中飞机驾驶舱遭遇非法控制的顶事件做了分析,找出飞机遭遇非法控制的薄弱环节,提出了一种改进的驾驶舱门控制流程和逻辑;闫锋等^[9]将故障树分析方法和蒙特卡罗方法相结合,分析了航空发动机控制系统故障导致的发动机丧失推力控制的失效状态,为航空发动机控制系统的适航审定提供了一种方法;张艳慧等^[10]运用系统安全性评估方法对某型号反推力系统的设计方案进行分析,构建了反推力装置空中意外打开的故障树,提出了系统架构的更改建议,为其他型号反推力系统的设计提供了借鉴;徐文华等^[11]、刘宇等^[12]提出了一种故障树自动建模方法,能够提高安全性分析的效率和完备性,但安全性分析模型的建立较为复杂,同时由于传统的故障树手动建模方法在工程中已广泛应用,要完全替代故障树手动建模方法仍存在困难。目前的研究主要集中于上述文献提到的各个系统,对飞机着陆系统的安全性分析,并未做更详细的研究。

本文以微波着陆系统为例,采用一种“紧凑”的故障树建模方法,对故障树的建模过程、概率的计算以及当安全性需求无法满足时,如何优化系统架构等方面展开研究,为飞机着陆系统的安全性分析和系统设计提供参考。另外,故障树分析方法是以微波着陆系统为载体展开,该方法的建模思路对飞机其他着陆系统(如 ILS 系统、GLS 系统等)也是适用的。

1 安全性评估过程

安全性评估的基本流程如图 1 所示。

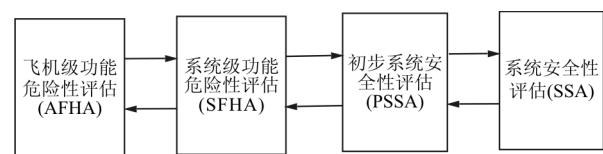


图 1 安全性评估过程^[13]

Fig. 1 Safety assessment process^[13]

安全性评估过程主要包括飞机级功能危险性评估(Aircraft Functional Hazard Assessment, 简称 AFHA)、系统级功能危险性评估(System Functional Hazard Assessment, 简称 SFHA)、初步系统安全性评估(Preliminary System Safety Assessment, 简称 PSSA)和系统安全性评估(System Safety Assessment, 简称 SSA)。

AFHA 通过系统地分析飞机级的功能, 识别和飞机级功能相关的失效状态, 并根据失效影响的严重程度对其分类。AFHA 的分析结果会通过初步飞机安全性评估(Preliminary Aircraft Safety Assessment, 简称 PASA), 将各个功能的安全性需求分配到系统。各系统根据分配结果, 进一步做 SFHA, 识别和系统级功能相关的失效状态和影响等级。失效状态的影响等级包括灾难性的、危险性的、重大的、轻微的和无安全影响的五大类, 对应的概率要求分别为 1.00×10^{-9} 、 1.00×10^{-7} 、 1.00×10^{-5} 、 1.00×10^{-3} 和无概率要求^[14]。SFHA 的分析结果输出给 PSSA, PSSA 通过对提出的系统架构进行系统性地检查, 以确定系统故障如何导致 SFHA 识别的功能危险, 以及怎样满足 SFHA 中识别的安全性需求。SSA 通过对已实现的系统设计做系统性地分析, 综合各种分析结果, 以确定系统实现能满足相关的安全性需求。

2 故障树分析

故障树分析(Fault Tree Analysis, 简称 FTA) 是一种自顶向下的分析方法, 作为最常用的安全性概率计算分析方法, 故障树分析广泛应用于 PSSA 和 SSA 中, 用于评估系统架构是否能满足系统危险性评估中定义的失效状态对应的概率要求。

2.1 概率值计算

电子设备通常具有随机的故障分布, 可用指数分布建模, 如式(1)所示。

$$P = 1 - e^{-\lambda \tau} \approx \lambda \tau \quad (1)$$

式中: P 为电子设备发生故障的概率; λ 为失效率; τ 为暴露时间或称为处于风险的时间。

基本事件对应的失效率 λ 取值可来源于可靠性预测、失效状态与影响分析(Failure Mode and

Effect Analysis, 简称 FMEA) 等。

2.2 割集

割集是导致故障树顶事件发生的任何基本事件或者基本事件的组合。割集分析作为故障树分析的重要组成部分, 通过对基本事件或基本事件组合的检查, 能够发现故障树结构中存在的潜在逻辑错误, 同时能根据对顶事件发生概率的贡献程度, 对割集的组合排序。

3 微波着陆系统

微波着陆系统(MLS)是一种全天候精密进近着陆系统, 工作频率为 5 031.0~5 090.7 MHz, 共 200 个波道, 依时间基准波束扫描原理工作, 由地面设备和机载设备组成。地面设备向空中辐射一个很窄的扇形波束, 在相应的覆盖区内往返扫描(覆盖范围通常为方位角 $-40^\circ \sim 40^\circ$, 仰角 $0.9^\circ \sim 15^\circ$), 对方位而言, 在水平方向上左右往返扫描, 对仰角而言, 在垂直方向上上下往返扫描。方位波束左右往返扫描的情况如图 2 所示。

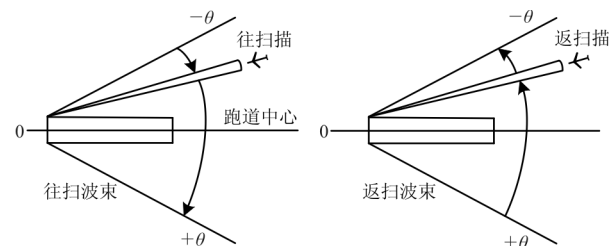


图 2 微波着陆系统角测量原理

Fig. 2 Angle measurement principle of MLS

假设飞机处于微波着陆系统的覆盖区, 当方位波束相对于跑道中心线从左往右往扫描碰到飞机时, 机载设备收到一个往扫脉冲, 当波束从右向左返扫描碰到飞机时, 机载设备收到一个返扫脉冲。由于波束的扫描速率是已知的, 通过测量往扫脉冲和返扫脉冲之间的时间间隔, 就能得到飞机相对于跑道中心线的方位角。俯仰角的测量原理和方位角类似, 区别仅在于仰角波束是上下往返扫描的。测量出方位角和俯仰角后, 就得到了飞机相对于跑道中心线的方位偏差和相对于下滑道的俯仰偏差, 从而为飞机提供着陆引导信息。

4 针对微波着陆系统的故障树分析

4.1 微波着陆功能的失效状态

假设系统功能危险性评估(SFHA)中识别出

的关于微波着陆功能的失效状态如表 1 所示,表中列出了失效状态及其编号、适用的飞行阶段、失效影响、等级分类和概率要求。当影响等级为重大时,对应的概率要求为 1.00×10^{-5} 。

表 1 微波着陆系统功能危险性评估表

Table 1 Functional hazard assessment for microwave landing system

编号	失效状态	阶段	失效影响	等级分类	概率要求
34-F37-01	完全丧失两侧的微波着陆信息 (Complete loss of both MLS information)	进近着陆	飞机:丧失 MLS 信息,极大地降低了飞机安全裕度 机组:驾驶员必须放弃微波着陆,极大地增加了机组的工作负担 乘客:无	重大的	1.00×10^{-5}

4.2 微波着陆系统框图

假设微波着陆系统的概念框图如图 3 所示。

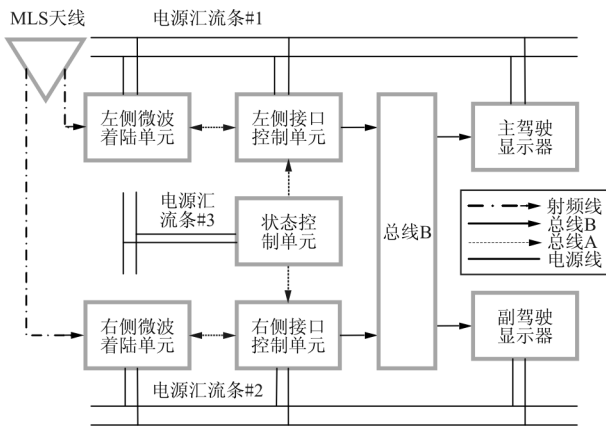


图 3 微波着陆系统概念框图

Fig. 3 Conceptual MLS block diagram

微波着陆系统由两套微波着陆子系统构成,包括两个微波着陆单元(Microwave Landing System Unit,简称 MLSU)和一个双路输出的 MLS 天线。MLSU 接收来自 MLS 天线的射频信号,同时通过 A 总线接收来自状态控制单元(Status Control Unit,简称 SCU)经接口控制单元(Interface Control Unit,简称 ICU)转发的波道信息,调谐到对应的工作频点,将射频信号解调后,计算出方位偏差和俯仰偏差。方位偏差和俯仰偏差数据经 A 总线发送至接口控制单元,再由接口控制单元路由至 B 总线网络,最终送至显示器显示。

供电方面,采用电源汇流条 #1 为左侧的 ML-

SU、左侧的 ICU 以及主驾驶显示器(Pilot Display)供电;电源汇流条 #2 为右侧的 MLSU、右侧的 ICU 以及副驾驶显示器(Copilot Display)供电;电源汇流条 #3 为 SCU 供电。

4.3 完全丧失两侧微波着陆信息的故障树分析

4.3.1 故障树建模方法

常规的故障树建模方法在构建故障树时,较容易忽略一些中间事件,过快地从顶事件分解到底事件。在系统架构不复杂的情况下,该方法构建的故障树可信度仍较高,但针对复杂的系统设计,往往会出现分析的遗漏或不完备。

本文在构建完全丧失两侧微波着陆信息为顶事件的故障树时,采用一种“紧凑”的故障树建模方法,如图 4 所示。

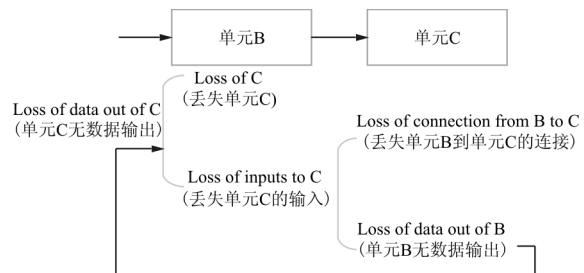


图 4 故障树建模方法概念框图

Fig. 4 Fault tree modeling method conceptual diagram

假设某数据经单元 B 传送至单元 C,故障树分析的起点是单元 C 无数据输出,该事件可分解为

丢失单元 C 或丢失单元 C 的输入。丢失单元 C 的输入又可进一步分解为丢失单元 B 到单元 C 的连接或单元 B 无数据输出。单元 B 无数据输出又回到故障树分析的起点,可按同样的方法进行分解,直到找出最底层的基本事件。

如果将单元 B 和单元 C 组成的框图看作一个最小单元,那么复杂的系统架构可看作是由多个这样的最小单元串联和并联而成,通过循环使用该建模方法,就能层层递进地完成故障树的分解。

4.3.2 故障树分析过程

针对完全丧失两侧的微波着陆信息(34-F37-01)的失效状态,其详细的故障树分析过程如图5~图10所示。该分析假设主驾驶显示器仅从左侧微波着陆单元接收微波着陆方位和俯仰偏差数据,副驾驶显示器仅从右侧微波着陆单元接收微波着陆方位和俯仰偏差数据。整个故障树由两个子故障树组成,包括完全丧失主驾驶显示器的微波着陆信息(G10)和完全丧失副驾驶显示器的微波着陆信息(G7)。G10对应的故障树由第1页~第6页构成,G7对应的故障树由第7页~第12页构成。由于G7和G10完全相似,区别仅在于一个是右侧,一个是左侧,出于简洁性和篇幅的考虑,并未列举第7页~第12页的内容。

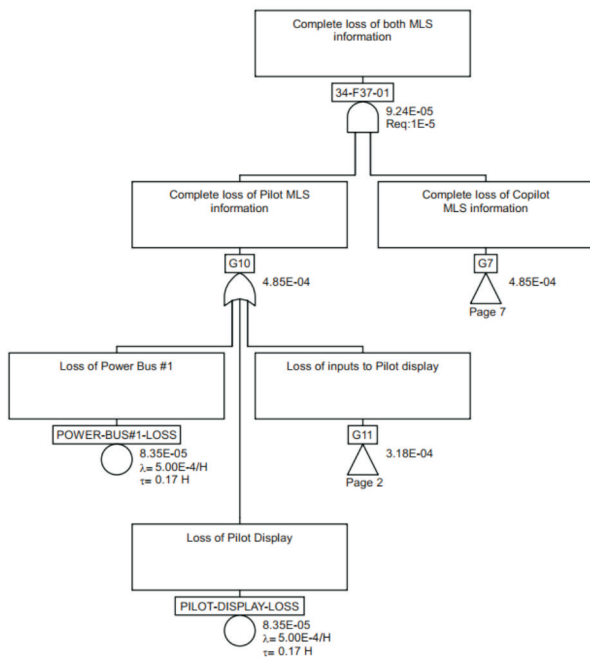


图 5 完全丧失两侧 MLS 信息(第 1 页)

Fig. 5 Complete loss of both MLS information (Page 1)

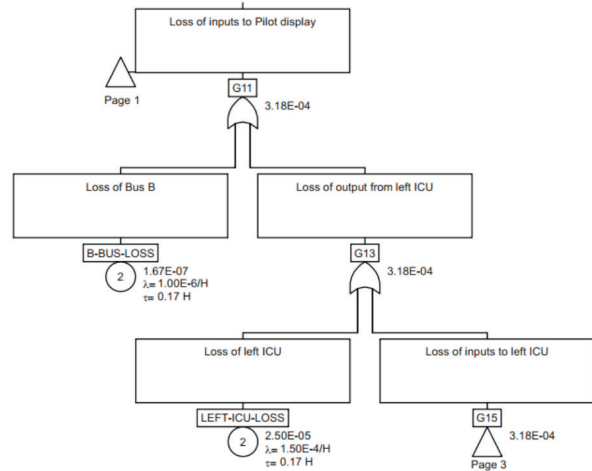


图 6 完全丧失两侧 MLS 信息(第 2 页)

Fig. 6 Complete loss of both MLS information (Page 2)

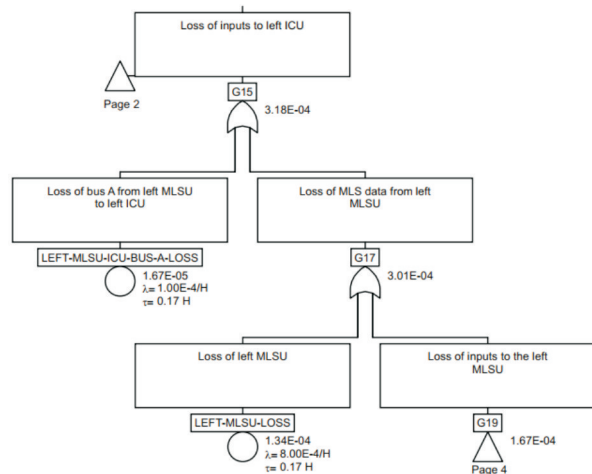


图 7 完全丧失两侧 MLS 信息(第 3 页)

Fig. 7 Complete loss of both MLS information (Page 3)

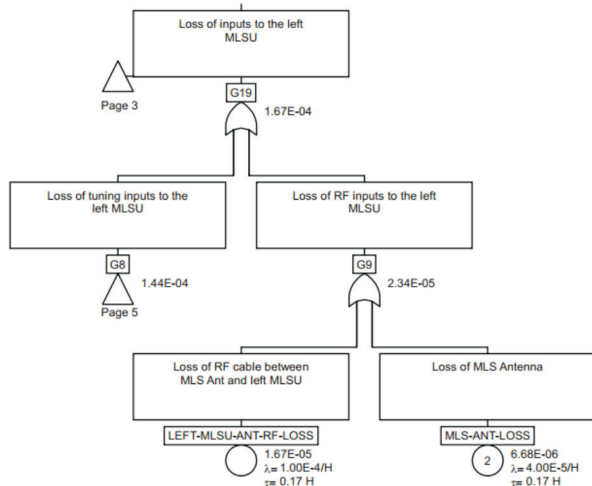


图 8 完全丧失两侧 MLS 信息(第 4 页)

Fig. 8 Complete loss of both MLS information (Page 4)

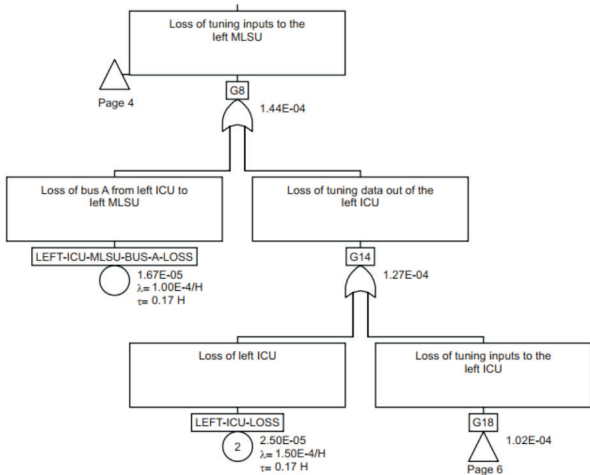


图 9 完全丧失两侧 MLS 信息(第 5 页)

Fig. 9 Complete loss of both MLS information (Page 5)

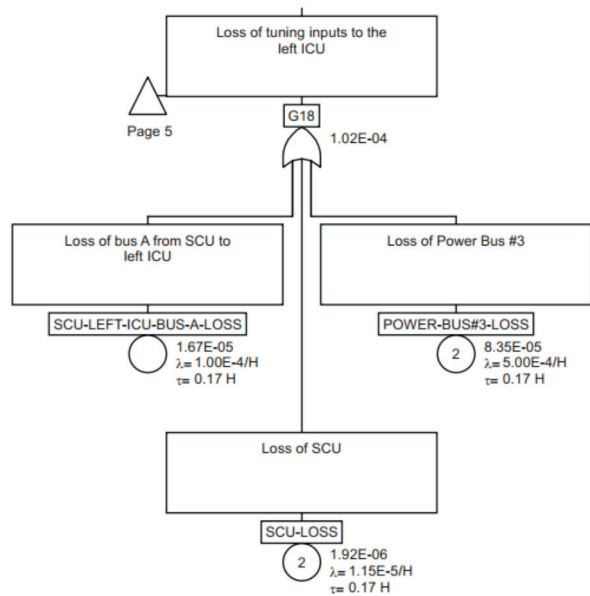


图 10 完全丧失两侧 MLS 信息(第 6 页)

Fig. 10 Complete loss of both MLS information (Page 6)

针对完全丧失主驾驶显示器的微波着陆信息的顶事件,导致其发生的原因主要包括:丧失主驾驶显示器、丧失输入路径(如总线 A、总线 B 和射频线)、丧失状态控制单元、丧失左侧接口控制单元、丧失左侧微波着陆单元、丧失微波着陆天线以及丧失飞机电源。

故障树中底事件符号圈内的数字代表该底事件在整个故障树中出现的次数。如果底事件仅发生了 1 次,则符号圈内默认显示空白。如果底事件发生的次数大于 1 次,则符号圈里将显示对应的数

字。例如,LEFT-ICU-LOSS 在故障树第 2 页和第 5 页各出现 1 次,则符号圈内显示“2”。B-BUS-LOSS 在第 2 页和第 8 页各出现 1 次(故障树第 8 页并未在文中列举),则符号圈内显示“2”。

由于微波着陆功能应用于飞机的进近着陆阶段,假设进近着陆的时间为 10 min,则暴露时间约等于 0.17 h。整个故障树分析过程中,涉及的所有基本事件对应的失效率如表 2 所示。

表 2 失效率信息汇总

Table 2 Failure rate information summary

序号	描述	失效率/fh
1	总线 B 故障	1.00×10^{-6}
2	显示器故障	5.00×10^{-4}
3	接口控制单元故障	1.50×10^{-4}
4	总线 A 故障	1.00×10^{-4}
5	射频电缆故障	1.00×10^{-4}
6	微波着陆单元故障	8.00×10^{-4}
7	微波着陆天线故障	4.00×10^{-5}
8	电源汇流条故障	5.00×10^{-4}
9	状态控制单元故障	1.15×10^{-5}

在整个故障树中,由于有基本事件出现的次数不止 1 次,在计算顶事件的发生概率时,故障树分析工具会先做布尔代数化简,再根据化简后的逻辑关系做概率计算,以保证概率值的真实性。基于表 2 所假设的失效率,经故障树分析工具计算后,结果表明,完全丧失两侧微波着陆信息的发生概率为 9.24×10^{-5} ,不能满足 1.00×10^{-5} 的概率要求。

4.3.3 割集报告

割集报告列举了所有割集对应的基本事件或基本事件的组合、发生概率以及该概率占顶事件发生概率的百分比,并按照概率重要度对割集按从大到小排序。

当 34-F37-01 发生概率为 9.24×10^{-5} 时,对应的割集报告如表 3 所示,表中列举了对顶事件发生概率贡献最大的前 5 个割集组合、对应的概率值和所占的百分比,可以看出:电源汇流条 #3 故障、微波着陆天线故障、状态监控单元故障和总线 B 故障均是单点事件,任何一个事件发生都能导致完全丧失两侧的微波着陆信息。电源汇流条 #3 故障作为最大贡献者,发生的概率为 8.35×10^{-5} ,占顶事件发生概率的 90.3%;微波着陆天线故障作为第二贡献者,发生的概率为 6.68×10^{-6} ,仅占顶事

件发生概率的 7.3%。表明为了让顶事件的发生概率满足 1.00×10^{-5} 的要求,需要围绕最大贡献者——丧失电源汇流条 #3 做进一步改进。

表 3 割集报告(34-F37-01= 9.24×10^{-5})

Table 3 Cutset report (34-F37-01= 9.24×10^{-5})

概率值	百分比/%	基本事件或组合
8.35×10^{-5}	90.3	POWER-BUS#3-LOSS
6.68×10^{-6}	7.3	MLS-ANT-LOSS
1.92×10^{-6}	2.1	SCU-LOSS
1.67×10^{-7}	0.1	B-BUS-LOSS
1.78×10^{-8}	0.1	LEFT-MLSU-LOSS RIGHT-MLSU-LOSS

4.4 改进措施

为了满足 1.00×10^{-5} 的概率要求,围绕电源汇流条 #3 有两种改进措施。

4.4.1 措施一

最简单且代价最小的措施是考虑能否进一步降低电源汇流条 #3 的失效率或者找到另一种失效率更低的电源汇流条替代电源汇流条 #3。假设电源汇流条 #3 的失效率可从 5.00×10^{-4} 降低到 1.00×10^{-5} ,代入故障树计算出顶事件发生的概率为 1.06×10^{-5} 。由于 1.06×10^{-5} 和 1.00×10^{-5} 非常接近,可认为已满足 1.00×10^{-5} 的概率要求。

当 34-F37-01 发生概率为 1.06×10^{-5} 时,对应的割集报告如表 4 所示,可以看出:当电源汇流条 #3 的失效率降低至 1.00×10^{-5} 后,最大贡献者已不再是电源汇流条 #3 故障,而转换成微波着陆天线故障。若需进一步降低顶事件发生概率,可围绕微波着陆天线采取改进措施,如将当前微波着陆天线替换为两个单路输出的微波着陆天线,但成本也会相应地增加。

表 4 割集报告(34-F37-01= 1.06×10^{-5})

Table 4 Cutset report (34-F37-01= 1.06×10^{-5})

概率值	百分比/%	割集组合
6.68×10^{-6}	63.1	MLS-ANT-LOSS
1.92×10^{-6}	18.1	SCU-LOSS
1.67×10^{-6}	15.8	POWER-BUS#3-LOSS
1.67×10^{-7}	1.5	B-BUS-LOSS
1.78×10^{-8}	0.2	LEFT-MLSU-LOSS RIGHT-MLSU-LOSS

4.4.2 措施二

假设电源汇流条 #3 的失效率无法降低,另一种可能的改进措施是增加一路应急汇流条对状态控制单元供电,同时引入一个电源监视控制单元(Power Monitor Control Unit,简称 PMCU),优化后的状态控制单元供电框图如图 11 所示。PMCU 具有电压监视和电压切换的功能,系统上电后,PMCU 默认选择接通电源汇流条 #3 为状态控制单元供电,一旦监视到电源汇流条 #3 的电压丧失时,PMCU 会选择接通应急汇流条 #4 为状态控制单元供电,从而提高供电的可靠性。

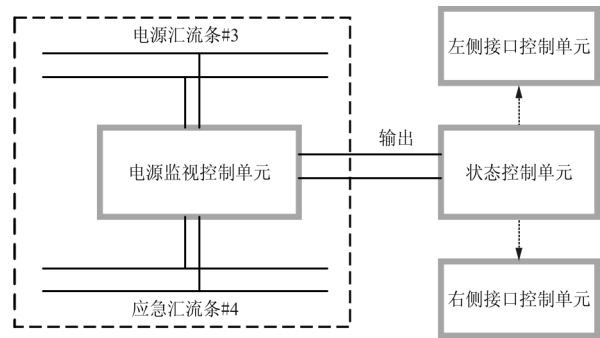


图 11 状态控制单元供电框图(优化后)

Fig. 11 Power supply for SCU (after optimized)

供电优化后,完全丧失对 SCU 供电的子故障树如图 12 所示,包括电源汇流条 #3 故障同时 PMCU 无法接通应急汇流条 #4,以及电源汇流条 #3 和应急汇流条 #4 同时故障。

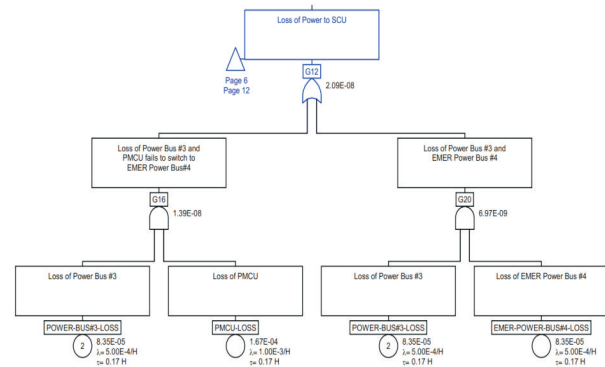


图 12 完全丧失 SCU 电源的子故障树(优化后)

Fig. 12 Fault tree for loss of power to SCU

(after optimized)

假设 PMCU 的失效率为 1.00×10^{-3} 、电源汇流条 #3 和应急汇流条 #4 的失效率仍为 5.00×10^{-4} ,计算出丧失 SCU 电源的概率为 $2.09 \times$

10^{-8} 。将图 12 所示的子故障树代入整个故障树中,计算出完全丧失两侧 MLS 信息的发生概率为 8.94×10^{-6} ,满足 1.00×10^{-5} 的概率要求。

4.4.3 结果对比

原始方案及加入两种改进措施方案的结果对比如表 5 所示,概率要求值为 1.00×10^{-5} 。

表 5 三种不同方案结果对比

Table 5 Comparison results for the three different methods

措施	概率计算值	是否满足要求	改进方法
原始方案	9.24×10^{-5}	否	无
措施一	1.06×10^{-5}	是	降低电源汇流条 #3 的失效率
措施二	8.94×10^{-6}	是	增加应急汇流条 #4 和电压监视控制单元

5 结 论

(1) “紧凑”的故障树建模方法对故障树层与层之间的关系衔接更加紧密,能更好地保证故障树构建过程的逻辑性和完整性。针对复杂的系统架构,只需循环使用该方法,即可完成复杂故障树的构建。该建模方法还能在一定程度上保证不同安全性分析人员构建的故障树具有相似的结构,便于适航当局开展评审工作。

(2) 当安全性概率要求无法满足时,故障树分析可根据割集报告找出对顶事件发生概率的最大贡献者,为系统架构的优化指明方向。

(3) 当安全性概率要求无法满足时,可从两方面采取改进措施,一是考虑能否进一步降低最大贡献者的失效率,二是考虑如何围绕最大贡献者增加冗余度设计,从而满足安全性概率要求。

参考文献

- [1] 陈高平, 邓勇. 航空无线电导航原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 443-456.
CHEN Gaoping, DENG Yong. Principles of aeronautical radio navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 443-456. (in Chinese)
- [2] 焦卫东, 唐志虎, 沈笑云, 等. 北斗 GBAS 着陆系统信号覆盖评估方法[J]. 电波科学学报, 2016, 31(5): 978-987.
JIAO Weidong, TANG Zhihu, SHEN Xiaoyun, et al. Assessment method of signal effective coverage for BDS-based GBAS landing system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(5): 978-987. (in Chinese)
- [3] 刘瑞华, 曹晖. 基于北斗的飞机进近着陆系统可视化仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 3753-3760.
LIU Ruihua, CAO Hui. Visual simulation of aircraft approach and landing system based on Beidou[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3753-3760. (in Chinese)
- [4] 郭博智, 王敏芹, 阮宏泽. 民用飞机安全性设计与验证技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
GUO Bozhi, WANG Minqin, RUAN Hongze. Safety design and verification in civil aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [5] SAE. (R) Guidelines for development of civil aircraft and systems; SAE ARP 4754 REV. A[S]. US: Society of Automobile Engineers Inc., 2010.
- [6] 王栋. 基于动态故障树分析的民用飞机辅助动力装置系统安全性评估[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(3): 48-52.
WANG Dong. Safety assessment of auxiliary power unit (APU) system for civil aircraft based on dynamic fault tree analysis (DFTA)[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014(3): 48-52. (in Chinese)
- [7] 王小辉, 车程, 瑚洋, 等. 基于故障树的飞机结冰探测系统安全性分析[J]. 航空工程进展, 2018, 9(2): 267-273.
WANG Xiaohui, CHE Cheng, HU Yang, et al. Safety analysis of aircraft icing detection system based on fault tree[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(2): 267-273. (in Chinese)
- [8] 陆峥, 刘剑. 基于故障树分析方法的民机飞机驾驶舱门控制逻辑改进设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(1): 44-47.
LU Zheng, LIU Jian. Improved design of control logic for civil aircraft cockpit door based on fault tree analysis[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(1): 44-47. (in Chinese)
- [9] 闫锋, 尚永锋, 付继龙. 基于故障树-蒙特卡罗模拟的航空发动机控制系统适航审定安全性分析方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 363-370.
YAN Feng, SHANG Yongfeng, FU Jilong. Airworthiness compliance validation safety assessment method of aero-engine control system based on fault tree-Monte Carlo simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 363-370. (in Chinese)
- [10] 张艳慧, 秦浩, 王代军. 发动机反推力系统安全性设计[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7): 1784-1792.
ZHANG Yanhui, QIN Hao, WANG Daijun. Engine reverser thrust system safety design[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1784-1792. (in Chinese)
- [11] 徐文华, 张育平. 一种基于航电系统架构模型的故障树自动建模方法[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(12): 2269-2277.
XU Wenhua, ZHANG Yuping. A fault tree auto-modeling method based on avionics system architecture model[J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(12): 2269-2277. (in Chinese)

- [14] IBRAHIM A S, EVGENY P P, DAVID J E. Experimental and numerical investigation of rotating bladed disk forced response using underplatform friction dampers[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130: 042503-1-11.
- [15] 宁智轶, 杜少辉, 韩清凯, 等. 模拟叶片气激及涂层阻尼减振有效性研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 14-17.
NING Zhiyi, DU Shaohui, HAN Qingkai, et al. Study on validity of air-excited vibration and coating vibration damping of simulation blade[J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 14-17. (in Chinese)

作者简介:

罗莉(1983—),女,硕士,工程师。主要研究方向:发动机强度与试验,复合材料。

黄大永(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:发动机强度与试验。

(编辑:马文静)

(上接第 71 页)

- [12] 刘宇, 刘永超. 航电系统安全性分析工具设计与研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(3): 10-16.
LIU Yu, LIU Yongchao. Design and research on safety analysis tool for avionics system[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017(3): 10-16. (in Chinese)
- [13] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment; SAE ARP4761 [S]. US: Society of Automobile Engineers Inc., 1996.
- [14] FAA. System design and analysis: FAA-AC 25.1309-1B [S]. US: FAA, 2002.

作者简介:

张辉(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机通信导航系统集成和验证、系统安全性分析。

陈世浩(1979—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机通信导航监视系统设计、集成和验证。

(编辑:马文静)

(上接第 78 页)

- LIU Hailiang, WANG Lixin. Evaluation of directional ground stability and control characteristics in crosswind landing for civil airplane based on digital virtual flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(3): 516-525. (in Chinese)
- [20] 黄淼, 廉滋鼎, 左仔滨, 等. 水陆两栖飞机模型水池波浪试验研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(1): 74-78.
HUANG Miao, LIAN Ziding, ZUO Zaibin, et al. Experimental study on motion response of a seaplane on waves[J]. Aeronautical Science Technology, 2016, 27(1): 74-78. (in Chinese)
- [21] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
CHU Lintang. Seaplane hydrodynamic design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [22] 盛振邦. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
SHENG Zhenbang. The principle of ships[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019. (in Chinese)
- [23] 王峥华, 李超. 多发飞机着陆进场最小操纵速度人机闭环仿真[J]. 飞行力学, 2015, 33(1): 78-82.

WANG Zhenghua, LI Chao. Aircraft-pilot closed loop simulation of the minimum control speed during landing approach for multi-engine airplane[J]. Flight Dynamics, 2015, 33(1): 78-82. (in Chinese)

作者简介:

王峥华(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行力学、飞行器设计。

段旭鹏(1980—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:空气动力学、飞行器设计。

程志航(1983—),男,学士,工程师。主要研究方向:飞行力学、飞行器设计。

孙卫平(1964—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器设计。

(编辑:马文静)