

文章编号: 1674-8190(2023)01-057-08

一种新风险识别方法在民用飞机高升力系统研制中的应用

安刚¹, 刘人境², 殷广强¹

(1. 航空工业庆安集团有限公司, 西安 710077)

(2. 西安交通大学 管理学院, 西安 710049)

摘要: 高升力系统是保证飞机飞行安全的关键系统之一, 故对其安全可靠性的要求高。在高升力系统研制过程中, 应用成熟度较低的技术会增加研制风险。结合工程数据, 在适航安全性设计与分析方法的基础上, 提出研制技术风险识别方法; 以某民用飞机高升力系统为例, 识别影响其安全性的技术风险, 并给出技术改进方法和风险控制策略。结果表明: 某民用飞机高升力系统的襟翼非指令放下和非指令收起存在风险, 通过降低襟翼电子控制装置控制通道和监控通道模块的失效概率, 可将襟翼非指令放下/收起的失效概率从 $1.656 \times 10^{-9}/\text{fh}$ 降低到 $9.424 \times 10^{-10}/\text{fh}$, 达到了系统安全性要求, 可以规避风险。

关键词: 安全性分析; 风险识别; 风险评估; 系统功能危险性分析; 故障树分析

中图分类号: V221⁺.91; V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.06

Application of a new risk identification method in the development of civil aircraft high lift system

AN Gang¹, LIU Renjing², YIN Guangqiang¹

(1. AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

(2. School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High lift system is one of the key systems to ensure aircraft flight safety, so its safety and reliability are highly required. In the development of high lift system, the application of less mature technology will increase the development risk. Combined with engineering data, on the basis of airworthiness safety design and analysis methods, a development technology is established. Taking a civil aircraft high lift system as an example, the risk identification method identifies the technical risks affecting its safety, and gives the technical improvement method and risk control strategy. The results show that there are risks in the non-commanded down of the flap and the non-commanded retract of the flap in a high lift system of a civil aircraft. By reducing the failure probability of the control channel and the monitor channel module of the flap electronic control unit, the failure probability of the non-command down/retract of the flap can be reduced from $1.656 \times 10^{-9}/\text{fh}$ to $9.424 \times 10^{-10}/\text{fh}$, which meets the system safety requirements and avoids risks.

Key words: safety analysis; risk identification; risk assessment; system function hazard analysis; fault tree analysis

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA104)

通信作者: 殷广强, guangqiang12345@163.com

引用格式: 安刚, 刘人境, 殷广强. 一种新风险识别方法在民用飞机高升力系统研制中的应用[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 57-64.

AN Gang, LIU Renjing, YIN Guangqiang. Application of a new risk identification method in the development of civil aircraft high lift system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 57-64. (in Chinese)

0 引言

飞机研制中存在的风险,需要采用风险管理进行控制。风险管理并非仅仅是为了降低风险,而是要在降低风险所能取得的收益和所要付出的代价之间寻求平衡,一般包括风险识别、风险评估、风险控制和风险跟踪等。风险识别是风险管理的核心和基础,准确地识别出潜在的技术风险,不仅可以有效应对“拖节点、涨经费、降指标”等研制风险,还可以降低或应对运营风险。根据航空安全报告系统(Aviation Safety Reporting System,简称ASRS)统计,航空事故与高升力系统直接相关的约占十分之一,可以说高升力系统是保证飞机飞行安全的关键系统之一^[1]。国外高升力系统所应用技术的成熟度至少在6级以上,而我国航空工业的技术基础预研、试验环境、工程经验还相对薄弱,有些技术的成熟度只能达到3~4级,较低的技术成熟度,增加了研制和运营过程中的风险^[2]。

国内外有关武器装备项目技术风险管理的相关理论较多^[3-8],不同理论应用于工程实践的效果却千差万别。我国武器装备工程的诸多风险管理方法均建立在以预防为主的质量管理方法的基础上^[9],也有采用失效仿真模型或大数据来推演的^[10-11]。航天、发动机、航海等工程领域的风险管理方法和实践较多^[12-16],而民用飞机研制起步较晚、经验较少,在研制过程中缺乏风险管理方法,风险管理流程不够成熟规范,还处于探索阶段^[17]。一些定性或定量的适航安全性分析方法不适用于风险管理^[18]。对具有高度安全性要求的民用飞机高升力系统,现有的风险管理方法很难有效地评价风险。不合适的风险管理方法应用于民用飞机高升力系统,会导致一系列适航安全风险问题。若识别出过多风险,会导致项目经费增加和周期延长;若识别出过少风险,又会导致风险后移,增加适航风险。空客和波音公司在民用飞机研制时,将高升力系统适航安全风险管理方法作为关键技术之一。综上,为准确识别研制过程中的技术风险,有必要参考国内外风险管理方法并结合国内民用飞机高升力系统特点,开展研制技术风险识别方法的创新与应用研究。

本文在适航安全性设计与分析方法的基础上,提出基于适航安全的技术风险识别方法,并采用工程数据对某民用飞机高升力系统研制技术风

险进行识别。

1 基于适航安全的风险识别方法

飞机要保证其在预期环境中的飞行安全,要投向市场并开始商业运行,必须取得适航证,而安全性设计与分析是取得适航证的关键,国外涉及研制阶段的指导性文件如图1所示。

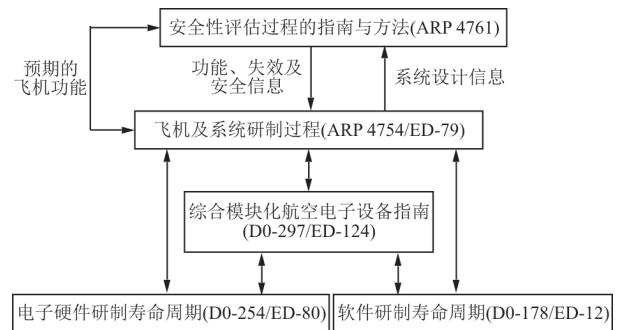


图1 涉及研制阶段的指南文件

Fig. 1 Guideline documents covering development phases

我国民航管理部门依据CCAR-25《运输类飞机适航标准》进行适航审定,对民用飞机机载系统和设备从飞机功能/需求分配、系统架构研制、系统需求分配、系统实现、系统/飞机综合与验证等研制过程进行适航符合性检查,以确保机载系统和设备满足安全适航要求。

基于适航安全的风险识别方法的基本思想是:首先,通过系统功能危险性分析,确定关键功能的危害影响等级;其次,以关键功能失效作为顶事件,以影响其功能的因素作为底事件建立故障树;然后,利用原理样机可靠性摸底的试验数据,借鉴国内外类似原理产品已有的统计数据,修正可靠性数据;最后,通过系统安全性分析,判断是否满足适航安全需求,将不满足要求的底事件识别作为系统中潜在技术风险。

可靠性数据是影响适航安全设计准确性的关键,针对国内可靠性数据积累相对较少或缺失的现状,经过一些具有典型技术特征的工程实践积累和总结分析,与进口设备、器件类比,将机载设备分为四类:直接采购进口设备(A类)、采用进口关键元器件(B类)、采用国产关键元器件(C类)、设备完全国产化研制(D类)。按照不同类型,依据国外统计数据、国内可靠性仿真或可靠性验证结果,与工程数据对比分析,采取不同加权系数修正原可靠性数据,获取最终可靠性数据,其方法流程

如图 2 所示。

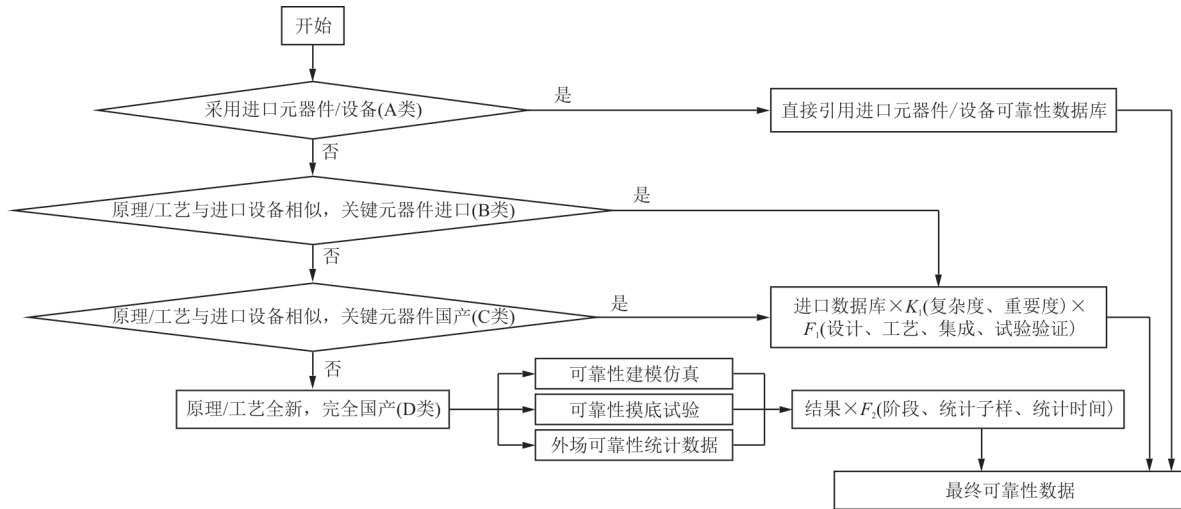


图 2 可靠性数据分析方法
Fig. 2 Reliability data analysis method

图 2 中,关重度系数 K_1 为

$$K_1 = K_f \times K_z \quad (1)$$

式(1)中,设备的复杂度系数 K_f 按照设备包括机械、电气/电子、液压/气压、软件等组合程度的复杂性分为 1~5 级,取值为 0.2~1.0,复杂度越高, K_f 值越小;设备的重要度 K_z 按照对系统的影响度分为灾难级、危险级、较大影响、较小影响和无影响 5 个级别,分别取 0.2~1.0,影响级别越高, K_z 值越小。

技术成熟度被 NASA 划分为 9 个等级,等级越高表明技术越成熟,分别取值 0.1~0.9。图 2 中,成熟度系数 F_1 为

$$F_1 = F_s \times F_g \times F_j \times F_i \quad (2)$$

式(2)中,设计成熟度 F_s 需考虑原理、算法、关键技术、工程实践应用等因素;工艺成熟度 F_g 需考虑原材料特性、加工/焊接等工艺特性、表面处理、工艺认证等因素;集成成熟度 F_j 需考虑装配工装/夹具、检验工具、装配经验等因素;试验验证成熟度 F_i 需考虑试验方法(测试用例)、判定标准、测试工具、试验环境等因素。

图 2 中,统计系数 F_2 为

$$F_2 = F_p \times F_q \times F_r \quad (3)$$

式(3)中,阶段修正系数 F_p 需考虑项目所在研制阶段;子样修正系数 F_q 需考虑项目所需统计子样个数;统计时间修正系数 F_r 需考虑项目周期。

为确保飞机的设备和系统达到可接受的安全性水平,不同的故障模式严酷度级别(危害等级)有不同的安全性要求。其中,灾难级(I类)失

效概率不大于 $10^{-9}/\text{fh}$,危险级(II类)失效概率不大于 $10^{-7}/\text{fh}$ 。灾难级和危险级故障模式是适航设计和审查的重点,可由故障树分析(Fault Tree Analysis,简称 FTA)、故障模式及影响分析(Failure Mode and Effects Analysis,简称 FMEA)、初步系统安全性分析(Preliminary System Safety Analysis,简称 PSSA)和共因分析(Common Cause Analysis,简称 CCA)等方法确定其是否满足要求,进而识别技术风险。若已有数据表明不满足要求,则系统研制存在技术风险,要优化改进设计,提高研制保证等级,采用严格的过程控制和试验验证确保系统满足安全性要求,进而控制技术风险。

2 某民用飞机高升力系统风险识别

某民用飞机高升力系统有两个主要功能,一是在起飞阶段提供足够的升力,便于飞机以最短的滑跑距离和安全的离地速度起飞;二是在着陆阶段提供足够的升力和阻力,便于飞机以最小的接地速度和最短的滑跑距离安全着陆。其基本原理是通过控制飞机 4 块后缘襟翼的放下/收起,实现必要的升力或阻力控制,其系统架构如图 3 所示。因系统状态监控、故障重构和冗余容错等要求,安装了位置、不对称和倾斜等传感器,并配备了具有自监控功能的多余度计算机。不仅与外部有电源、液压源等接口,还与航电显控(DMC)、主飞控(PFCS)和起落架(LGS)等系统进行信息关联,实现飞机的综合信息管理。

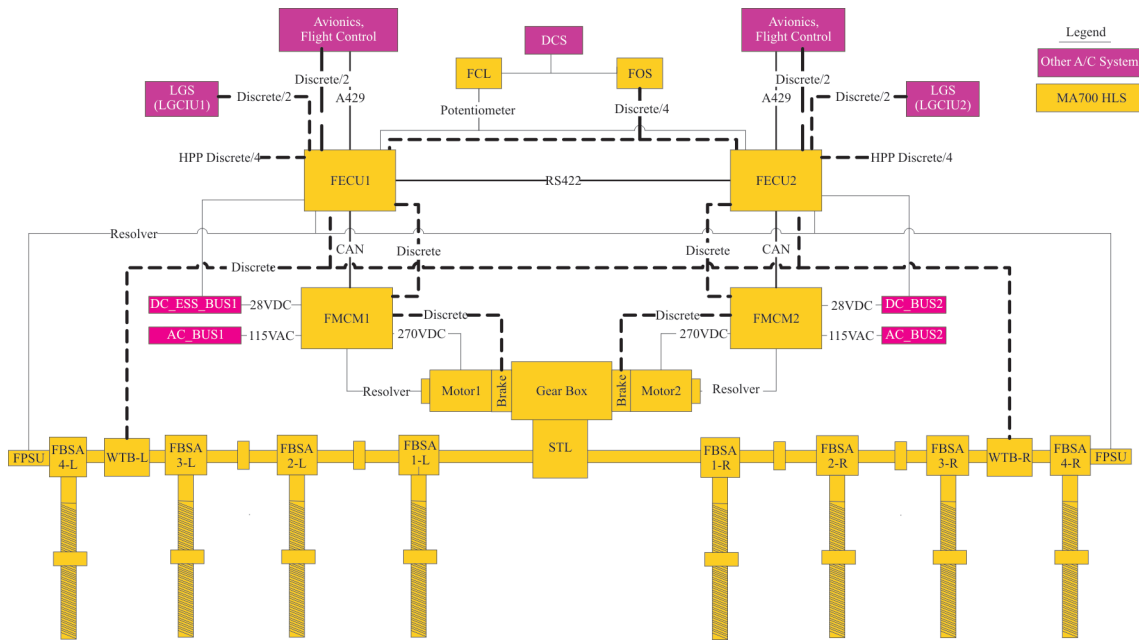


图 3 高升力系统架构

Fig. 3 High lift system architecture

根据第 1 节提出的基于适航安全的技术风险识别方法,首先采用系统功能危险性分析(SFHA)识别飞机和系统功能及其功能组合相关的故障模式,并确定每个故障模式的影响等级;其次采用系统初步安全性分析(PSSA)根据功能失效影响等级安全性要求,建立故障树分析系统架构以及生成的系统/产品是否满足安全性要求,进而识别出技术风险;最后系统安全性评估(SSA)采用半物

理、全物理系统地面和试飞等试验验证系统是否满足安全性要求,进而识别出技术风险。

系统功能危险性分析需要明确定义飞行阶段,并对特定的飞行阶段进行分析。根据某民用飞机的任务包线,可将飞行阶段分为滑出、起飞、起飞爬升、爬升、巡航、下降、进近、着陆和滑入等,如图 4 所示。

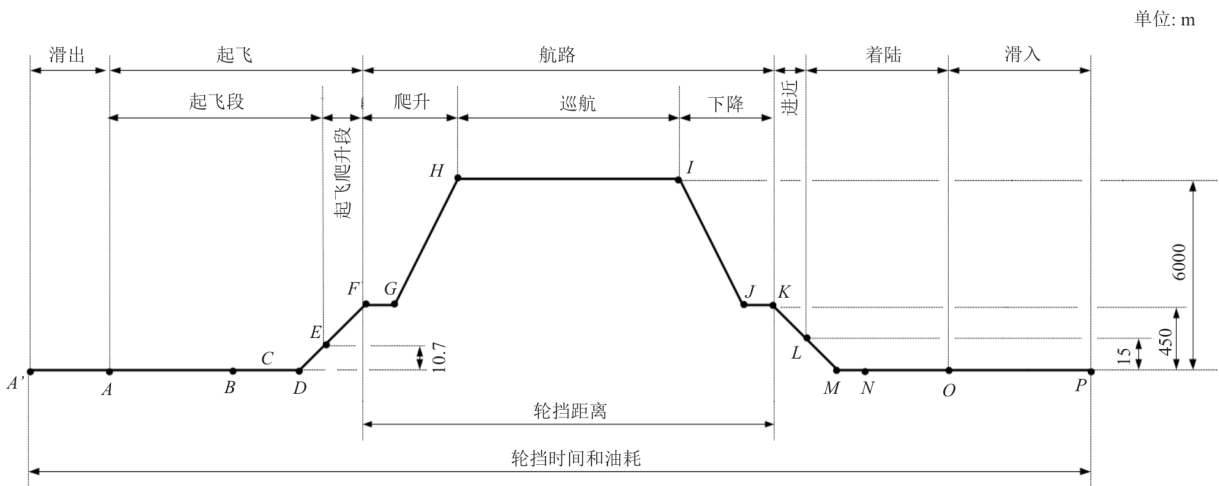


图 4 飞行任务包线

Fig. 4 Mission envelope

某民用飞机高升力系统的系统功能危险性分析结果如表 1 所示。其中灾难级(I类)失效状态共有 5 种:襟翼非指令放下(27-BA-1)、襟翼非指

令收起(27-BA-2)、襟翼不对称大于 3°(27-CA-1)、襟翼倾斜大于 2°(27-DA-1)、错误的系统状态和位置信息显示(27-FA-3);系统中无危险级(II

类)失效状态。

表 1 系统功能危害性列表
Table 1 System function hazard list

编号	功能	故障模式	工作阶段	失效影响	驾驶员识别	方法
27-BA-1	提供非指令运动保护功能	襟翼非指令放下	进近、着陆	飞机:起飞时,当飞机接近 V_1 且载荷很大时,会导致高能量的终止起飞;高速下的襟翼非指令放下可能超过它本身的动态特性限制,导致飞机失控甚至坠毁 机组:极难控制飞机,由于飞机坠毁而死亡 乘客:可能由于飞机坠毁而死亡	EICAS 襟翼位置指示	FHA SSA CCA
27-BA-2	提供非指令运动保护功能	襟翼非指令收起	进近、着陆、爬升	飞机:起飞时,飞机可能冲出跑道;爬升、着陆、复飞时,飞机缺乏足够的升力;近进时,襟翼非指令收起可能引起飞机掉高度,导致飞机失控甚至坠毁 机组:由于接近障碍物而无法正确采取纠正措施,并由于飞机坠毁而死亡 乘客:可能由于飞机失控而死亡	EICAS 襟翼位置指示	FHA SSA CCA
27-CA-1	提供系统不对称保护功能	襟翼不对称大于 3°	所有阶段	飞机:产生突然较大的翻滚力矩,结构损坏导致飞机失控坠毁 机组:难以控制飞机,随飞机坠毁而死亡 乘客:由于飞机坠毁而死亡	无	FHA SSA CCA
27-DA-1	提供襟翼倾斜保护功能	襟翼倾斜大于 2°	所有阶段	飞机:过度倾斜引起结构损坏,导致飞机失控坠毁 机组:难以控制飞机,随飞机坠毁而死亡 乘客:由于飞机坠毁而死亡	无	FHA SSA CCA
27-FA-3	提供系统状态和舵面位置信息	误导的系统状态和襟翼位置显示	所有阶段	飞机:可能由于飞行员的错误操作而导致结构损害或坠毁 机组:飞行员可能没有意识到襟翼真实位置和错误显示之间的差别,受误导信息影响而进行一些错误的操作,导致飞机结构损害或坠毁 乘客:可能由于飞机的损毁而绝大部分或者全部死亡	无	FHA SSA CCA

将表 1 中 5 种灾难级 (I 类)故障模式作为顶事件开展初步系统安全性分析,建立故障树从上而下分析系统故障成因,引用组成部件的可靠性数据,分析系统架构是否满足适航安全性要求,进

而识别出技术风险。在故障树分析中,底事件为各组成部件的可靠性数据,应用第 2 节所建立的可靠性数据分析法获得修正后的可靠性数据,如表 2 所示。

表 2 可靠性数据列表
Table 2 Reliability data list

序号	底事件名称	类别	原始数据/ h^{-1}	主要修正系数 (K_1, F_1, F_2)	修正后数据/ h^{-1}	备注
27-BA-1-201	襟翼操纵手柄发出错误的指令信号	D	1.579×10^{-12}	$F_2=0.95$	1.5×10^{-12}	预计值
27-BA-1-301	左襟翼位置传感器反馈错误的位置信号	D	1.684×10^{-6}	$F_2=0.95$	1.6×10^{-6}	预计值
27-BA-1-302	右襟翼位置传感器反馈错误的位置信号	D	1.684×10^{-6}	$F_2=0.95$	1.6×10^{-6}	预计值
27-BA-1-303	襟翼电子控制装置控制通道模块电路故障	C	1.250×10^{-4}	$K_1=0.4, F_1=0.4$	2.0×10^{-5}	仿真值
27-BA-1-304	襟翼电子控制装置控制通道接口电路故障	C	7.500×10^{-5}	$K_1=0.4, F_1=0.4$	1.2×10^{-5}	仿真值
27-BA-1-204	左右侧作动部件传动轴断裂	D	5.473×10^{-6}	$F_2=0.95$	5.2×10^{-6}	预计值
27-BA-1-305	动力驱动装置左侧 POB 失效	D	1.053×10^{-6}	$F_2=0.95$	1.0×10^{-6}	预计值
27-BA-1-306	动力驱动装置右侧 POB 失效	D	1.053×10^{-6}	$F_2=0.95$	1.0×10^{-6}	预计值
27-BA-1-307	襟翼电子控制装置监控通道模块电路故障	C	1.250×10^{-4}	$K_1=0.4, F_1=0.4$	2.0×10^{-5}	仿真值
27-BA-1-308	襟翼电子控制装置控接口电路故障	C	7.500×10^{-5}	$K_1=0.4, F_1=0.4$	1.2×10^{-5}	仿真值
27-BA-1-309	左侧翼尖制动器制动机构故障	D	3.684×10^{-6}	$F_2=0.95$	3.5×10^{-6}	预计值
27-BA-1-310	右侧翼尖制动器制动机构故障	D	3.684×10^{-6}	$F_2=0.95$	3.5×10^{-6}	预计值

5种故障模式的故障树分析结果表明,仅有“襟翼非指令放下(27-BA-1)”和“襟翼非指令收起(27-BA-2)”不满足“不大于 $10^{-9}/\text{fh}$ ”的安全性要求,即存在技术风险。

根据系统工作原理,导致襟翼非指令放下/收起的主要原因有两个:一是驱动通道使襟翼未按

指令运动,如手柄指令信号错误、位置反馈信号错误、控制信号错误和故障保护信号异常激活等,即飞行员操纵指令与襟翼的实际收放不匹配;二是外界气动载荷回吹而使系统保护功能丧失,如控制信号丧失、翼尖制动保护机构故障和掉压制动机构故障等。故障树如图5所示。

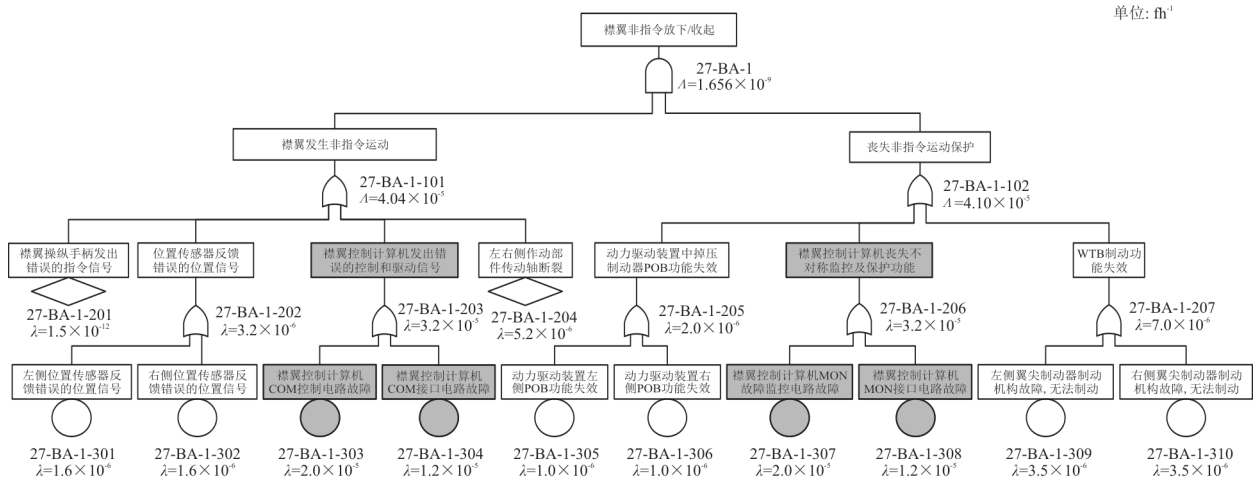


图5 襟翼非指令放下/收起故障树

Fig. 5 Flap non command down/retract fault tree

根据图5的故障树分析,襟翼非指令放下/收起的失效概率为 $1.656 \times 10^{-9}/\text{fh}$,不满足灾难级(I类)失效概率不大于 $10^{-9}/\text{fh}$ 的适航安全性要求,即存在技术风险。其主要原因是襟翼电子控制装置(FECU)中控制通道(COM)和监控通道(MON)模块失效概率较高,目前国内只能达到 $2 \times 10^{-5}/\text{fh}$,即高升力系统的襟翼电子控制装置的控制通道和监控通道模块存在技术风险。针对上述风

险采取的技术改进方法和风险控制策略是将襟翼电子控制单元的控制通道和监控通道模块的失效概率由 $2 \times 10^{-5}/\text{fh}$ 降低到 $1.2 \times 10^{-5}/\text{fh}$,襟翼非指令放下/收起的失效概率可以减小到 $9.424 \times 10^{-10}/\text{fh}$,满足系统安全性要求,如图6所示,可以看出:带有控制和监控的双通道襟翼电子控制装置是系统适航安全性的关键,在系统设计与验证中应控制控制通道和监控通道模块的研制技术风险。

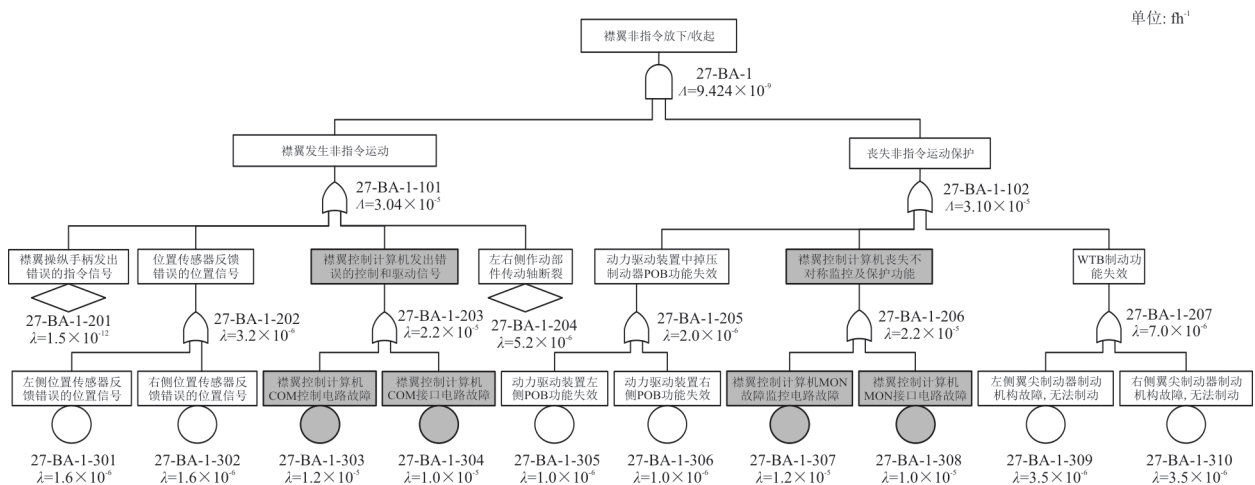


图6 改进后的襟翼非指令放下/收起故障树

Fig. 6 Improved flap non command down/retract fault tree

ISO/IEC Guide51:2014中将风险定义为

$$R = S \times P \quad (4)$$

式中:R为风险;S为后果的严酷度;P为发生的概率。

后果的严酷度主要表现在对性能指标和整体进度的影响。为了便于计算,将其分为5个级别:低、小、中、明显和高。当对性能指标和进度影响级别不一致时,以最大影响为主,如当对性能的影响为“中”,对进度的影响为“高”时,取后果的严酷度为“高”。风险发生的概率主要与技术成熟度相关,以该技术的应用为基准,分为5个级别:低、小、中、明显和高。根据工程经验,将后果的严酷度和风险发生的概率进行量化,如表3~表4所示。

表3 后果的严酷度判断标准
Table 3 Judgment standard of consequence severity

严酷度	判断标准		量化值
	对性能指标影响	对进度影响	
低	对性能指标无实质性影响	对进度无实质性影响	0.1~0.2
小	通过性能多余度设计,影响较小	对进度无影响	0.3~0.4
中	通过其他方法,控制影响	对进度有两个月影响	0.5~0.6
明显	重新设计架构,或改变其他系统需求	对进度有四个月影响	0.7~0.8
高	不能满足性能指标	对进度有超过四个月影响	0.9~1.0

表4 风险发生的概率判断标准
Table 4 Judgment standard of risk occurrence probability

发生概率	判断标准	量化值
低	以前有类似的应用和需求	0.1~0.2
小	结构特点与之前技术相似	0.3~0.4
中	之前有过设计,但应用场合和需求不同	0.5~0.6
明显	结构特点与之前的设计和应用完全不同	0.7~0.8
高	技术从未应用于任何应用场合	0.9~1.0

从表3可以看出:对系统功能和项目进度影响越小,相对风险因子(量化值)越小,反之就越大。从表4可以看出:若在项目中使用过类似技术,则技术成熟度越高,相对风险因子就越小,反之因子就越大。

根据后果的严酷度和风险发生的概率,可得风险的整体分布矩阵:0.1~0.3为低风险区,0.4~0.6为中风险区,0.7及以上为高风险区,如图7所示。风险控制策略就是在风险发生的概率和后果

的严酷度之间寻找实际中的最优解,高风险要加大人力、财力投入,采取严格控制研制过程。

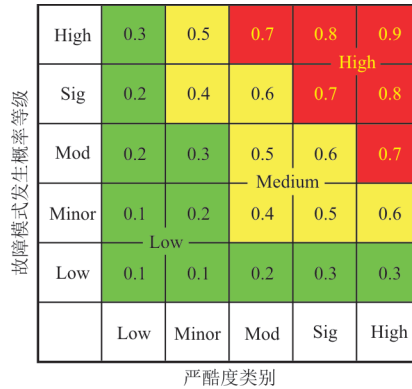


图7 风险识别矩阵

Fig. 7 Risk identification matrix

某民用飞机高升力系统带有自监控功能的多余度计算机可靠性指标由 $2 \times 10^{-5}/\text{fh}$ 提高到 $1.2 \times 10^{-5}/\text{fh}$,其技术改进方法主要是在元器件筛选、焊接工艺和集成验证等方面进行优化。襟翼电子控制装置出现技术风险的概率为“中”,对性能指标影响为“小”,对进度影响为“中”;后果的严酷度为“中”。其风险最终分值为0.5,属于中等风险。在设计过程保证体系中,风险控制策略是襟翼电子控制装置的元器件采取提高质量或者冗余设计措施,硬件研制保证等级设置为A级,通过严格的设计、工艺、试验过程控制提高控制通道和监控通道模块的可靠性,从而有效降低系统研制技术风险。

3 结 论

(1) 本文提出的基于适航安全的技术风险识别方法可以准确地识别某民用飞机高升力系统研制过程中存在的技术风险,进而为研制技术风险管理奠定基础。

(2) 本文识别出某民用飞机高升力系统的襟翼非指令放下和襟翼非指令收起存在风险,并通过降低襟翼电子控制装置控制通道和监控通道模块的失效概率,提高了设计的安全性,进而规避研制技术风险。

(3) 本文得到某民用飞机高升力系统在研制过程中技术风险发生的概率和后果的严酷度的量化指标,提高了风险管理的准确性。

参 考 文 献

[1] 高亚奎,安刚,支超有.大型运输机飞行控制系统试验技

- 术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
- GAO Yakui, AN Gang, ZHI Chaoyou. Flight control system test techniques for large transport aircraft[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 张新国. 国防装备系统工程中的成熟度理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- ZHANG Xinguo. Theory and application of maturity model in defense materiel system engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 徐哲, 吴瑾瑾. 武器装备项目技术风险研究现状及展望[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2008, 21(1): 6-9.
- XU Zhe, WU Jinjin. Status quo and prospect of research on technical risk for weapon system development[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2008, 21(1): 6-9. (in Chinese)
- [4] KÄMPPI P, GUINNESS R. Technical risk analysis for satellite based tracking systems[C]// 2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings. Herndon, VA, US: IEEE, 2010: 1-16.
- [5] KAWATSU K. System-level modeling and simulation-based approach to risk assessment for space systems[C]// 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). US: RAM, 2018: 1-8.
- [6] LOYD B D, KANNAN D. Identifying design patterns for risk management system using big data analytics[C]// 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI). US: IEEE, 2017: 305-312.
- [7] SHAH P, DAVENDRALINGAM N, DELAURENTIS D A. A conditional value-at-risk approach to risk management in system-of-systems architectures[C]// 2015 10th System of Systems Engineering Conference. US: IEEE, 2015: 457-462.
- [8] MENTES A, OZEN E. A hybrid risk analysis method for a yacht fuel system safety[J]. Safety Science, 2015, 79: 94-104.
- [9] 张世杰, 冯虹雁, 王九成. 风险管理技术在武器装备研制生产过程中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005(1): 6-10.
- ZHANG Shijie, FENG Hongyan, WANG Jiucheng. Application of risk management technology for design and production in weapon equipment [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005(1): 6-10. (in Chinese)
- [10] 徐一帆, 吕建伟, 谢宗仁, 等. 计及技术风险的复杂系统多分辨率风险评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(5): 161-170.
- XU Yifan, LYU Jianwei, XIE Zongren, et al. Multi-resolution risk assessment for complex system including technical risk[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(5): 161-170. (in Chinese)
- [11] 冯强, 曾声奎, 任羿, 等. 复杂产品研制过程技术风险的仿真评估[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(16): 5207-5211.
- FENG Qiang, ZENG Shengkui, REN Yi, et al. Simulation assessment for technical risk of complex product development process [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(16): 5207-5211. (in Chinese)
- [12] 程大林, 田玉蓉, 司群英, 等. 航天项目研制风险识别与分析探索[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(2): 146-150.
- CHENG Dalin, TIAN Yurong, SI Qunying, et al. The risk identification and analysis of aerospace project[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(2): 146-150. (in Chinese)
- [13] 王新敏, 陈勇. 航天器研制技术风险分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(1): 61-64.
- WANG Xinmin, CHEN Yong. Technology risk analysis on developing aircraft and space vehicles [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2010, 21(1): 61-64. (in Chinese)
- [14] 张刚, 王潇茵, 马宽, 等. 基于技术成熟困难度的航天型号研制风险管理方法[J]. 航天控制, 2011, 29(5): 77-81.
- ZHANG Gang, WANG Xiaoyin, MA Kuan, et al. A R&D risk management method of weapon based on advancement degree of difficulty [J]. Aerospace Control, 2011, 29(5): 77-81. (in Chinese)
- [15] 张桓荣, 高博. 超燃冲压发动机技术风险量化评估方法[J]. 航空计算技术, 2018, 48(3): 82-85.
- ZHANG Huanrong, GAO Bo. Quantitative evaluation method for technical risk of scramjet [J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(3): 82-85. (in Chinese)
- [16] 孙鹏才, 田涛, 罗马, 等. 舰船型号技术风险管理研究[J]. 中国造船, 2015, 56(1): 210-216.
- SUN Pengcai, TIAN Tao, LUO Ma, et al. Research on management of technique risk for warship models [J]. Shipbuilding of China, 2015, 56(1): 210-216. (in Chinese)
- [17] 王鑫. 航空研制项目技术风险评估模型研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(4): 68-71.
- WANG Xin. Research on technology risk evaluation model for aviation development project [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(4): 68-71. (in Chinese)
- [18] 赵丽艳, 顾基发. 概率风险评估(PRA)方法在我国某型号运载火箭安全性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2000(6): 91-97.
- ZHAO Liyan, GU Jifa. The application of probabilistic risk assessment approach to the safety analysis of one specific type of launch vehicle in China [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000(6): 91-97. (in Chinese)

作者简介:

安刚(1974—),男,博士,研究员。主要研究方向:风险管理,飞行控制系统设计,系统工程等。

刘人境(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:人工智能,复杂系统管理,多项目管理,风险管理及商务智能等。

殷广强(1983—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行控制系统设计等。

(编辑:马文静)