

民机持续适航事件风险评估流程研究

Occurrence Risk Analysis Process and Methods during Continuing Airworthiness of Civil Aircraft

王冠茹¹ 孙有朝¹ 李龙彪¹ 辛慧秋² 李扬²/

Wang Guanru¹ Sun Youchao¹ Li Longbiao¹ Xin Huiqiu² Li Yang²

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 210016;

2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

College of Civil Aviation, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

在民用飞机持续适航阶段,由于存在设计缺陷和制造缺陷,操作条件或环境条件超出设定的标准,可能出现影响航空器安全运行的事件。给出了民用飞机持续适航事件定义及来源,根据风险管理理论建立了民机持续适航阶段事件风险评估的流程。引入事件严重度指数和发生概率指数概念,给出计算方法,在此基础上得到事件风险水平。当事件风险处于不可接受或不可容忍范围内时,借助概率统计和安全性分析方法详细评估事件导致因素的严重性和发生的可能性,判断事件对单架飞机和整个机队的影响程度。

关键词:民用飞机;持续适航;不安全事件;风险分析;设计与制造

[**Abstract**] During the operation of civil aircraft, occurrences which affect the operation safety may exist due to design, manufacturing defects, the exceeding operation and environment condition. Presents the sources and classification of occurrence by the definition in the continued airworthiness. The risk assessment processes have been established based on the risk management theory. The severity and probability parameter of occurrence are defined and calculated by the developed method in this paper. Then the risk level of occurrence is obtained. The quantitative risk assessment of aircraft and fleet is also given to assess occurrence effect when the occurrence risk under unacceptable level.

[**Key words**] Civil Aircraft; Continuing Airworthiness; Unsafe Occurrence Risk Assessment; Design and Production

0 引言

航空器持续适航性,指航空器在取得由国家适航部门颁发的适航批准后,从交付使用到退役、报废的整个使用寿命期内,该产品始终处于安全运行状态。由于航空器在使用过程中可能出现失效或其它技术故障,影响飞行安全,因此航空器设计制造机构应收集航空器事件信息,分析、评估适航风险水平,并在此基础上采取必要的措施,有效地控制、消除风险,保证产品的持续适航性,从而保持飞机和整个机队持续安全。

目前,国内外学者在民航不安全事件风险评估

领域有一定研究^[1-4],但大多侧重于对民航企业、飞行安全或空管领域的风险评估,而缺乏对与航空器技术水平相关的不安全事件的风险评估研究。本文明确了持续适航阶段事件定义与来源,根据风险评估相关理论,针对航空器故障、失效和缺陷事件,建立了风险评估流程。提出事件严重度指数和事件发生概率指数表示事件后果严重性及事件发生的可能性,评定事件风险水平,并进一步给出单机和机队风险水平计算方法。根据分析结果,航空器设计制造部门可以采取相应的风险缓解措施降低事件风险,制定相应持续适航文件,保持飞机的持续适航性。

1 事件的定义与来源

事件(Occurrence),是指影响或可能影响飞机安全运行的信息。不安全事件,是指导致航空器处于不安全状态的事件。当航空器处于不安全状态时,事件的发生可能导致灾难性后果,通常表现为飞机失事,降低飞机或机组在不利运行状态下的操控能力,或者存在不可接受的风险,会对人员造成严重或致命的伤害。

事件来源主要包括四方面:设计制造机构、机务维修机构、运营机构和适航管理部门^[5]。当事件影响或可能影响航空器的安全运行、可能导致航空器处于不安全状态时,各机构有责任将不安全事件状况在规定时间内报送适航当局,同时各机构之间也应保持信息通畅,信息流转如图1所示。

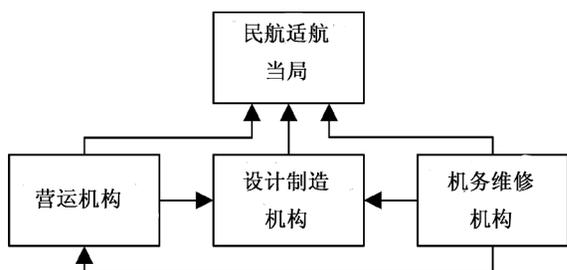


图1 事件信息在各机构间流转示意图

1.1 适航管理部门

从某一型号第一架飞机取得适航证投入使用起,直至该型号的最后架飞机退役的过程中,适航管理部门负责对所有的飞机实施适航监督、控制和管理。在此阶段,适航管理部门接收航空器设计制造机构、机务维修机构和运营机构报告的不安全事件信息,必要时颁发适航指令。

1.2 航空器营运人

每次飞行结束后,航空器营运人通过机载计算机和机组报告,收集航空器在飞行过程中发生的事件信息,将发现的问题和初步分析结果反馈给设计制造部门。根据事件严重度不同,运营不安全事件包括事故、民用航空器事故征候以及其他与民用航空器运行有关的不安全事件信息。

1.3 机务维修机构

机务维修机构收集在产品、零部件和设备维修或维护过程中可能导致威胁航空器安全的事件。例如可能导致维修错误的任何不正确或不完整的维修数据或维修程序,或是在某项检查或测试中,发现非测试项目的飞机零部件装配错误,航空器低

于最低设备清单(MEL)、外形缺损清单(CDL)或偏离放行指南(DDG)的标准放行并起飞等。

1.4 设计制造机构

设计制造机构收集机构内部、外部和局方发布的事件信息。内部信息是指在机构内部,航空器设计分析、制造过程、质量控制、试飞试验等过程中发现的事件信息(如设计缺陷),外部信息是指售后服务部门收集的航空器营运人和机务维修机构的事件信息,以及上级机关或其他部门传递来的事件信息。收集到信息后,设计制造机构对事件信息进行适航风险分析,并制定风险缓解措施或改正措施,降低事件风险,保持飞机持续适航性。

2 事件风险评估流程

在民机持续适航阶段,只有当飞机或零部件发生失效、故障或缺陷被观察到后才会成为事件。通过风险评估(Risk Assessment),对已发生的事件进行评估,分析事件发生的可能性及后果的严重性、判断事件对飞机造成的影响是否超出规定的适航风险水平,估计引发事件的危险源的失效率及其失效对系统或设备的影响,为制定风险缓解措施和改正措施提供决策支持。总体而言,事件风险评估包括危险源辨识、初步风险分析和详细风险分析三个阶段。图2给出民机风险评估流程及常用评估方法。

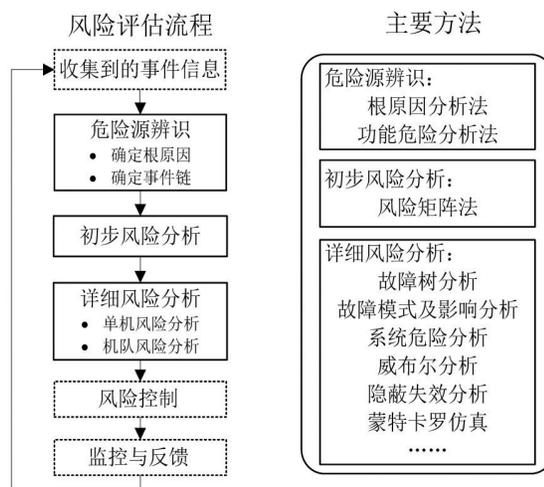


图2 不安全事件风险评估流程

2.1 危险源辨识

风险评估的首要任务是危险源辨识,即确定导致事件发生的因素,识别系统中可能导致危险的其它危险因素,并确定事故链。通过专业人员开展工程调查和危险源辨识讨论会等方式,确定风险发生区域与单元、事件发生时的环境和条件以及条件之

间互相影响的大小。分析事件原因时,应从硬件、软件、固件、人机接口、子系统相互关系和环境因素等不同方面进行考虑。如果事件非首次发生,还应参考经验数据,调查相似产品或功能发生的类似事件数据,以及其它机型是否有类似事件记录,从而确定该事件为单机或机队问题。

风险识别采用的主要分析技术是根原因分析。通过根原因分析可以得出事件发生的根原因,并确定事故链,即事件如何从初始事件发展到最终事件^[6]。必要时,可采用FHA或FMEA用来确定事件可能导致的潜在事故及事故结果。

2.2 初步风险分析

初步风险分析是通过定性或半定量分析方法确定事件的严重度等级和发生概率,并利用风险矩阵确定事件风险等级的分析过程。

(1) 确定事件严重度指数

事件严重度指数是事件后果严重性的表征,通过现场调研、工程分析判断,从事件实际产生后果、潜在影响和事件可能导致的其它后果三方面综合评估得出。根据民航业相关标准规定^[7],事件严重度等级分为5类,包括灾难性影响、危险影响、较大影响、较小影响和无影响。定义事件严重度指数S,取值范围为1至5。S等于5对应灾难性影响,S等于4对应危险影响,以此类推,如表1所示。如果某飞机系统或部件在一段时间内发生了多起事件,则采用加权平均法计算多起事件的严重度指数^[2]。

表1 事件严重度分类

严重度指数	事件影响	事件影响及举例
5	灾难性	事件/状态影响飞机持续安全飞行或着陆,导致飞行机组丧失工作能力,造成较多乘客或客舱机组死亡。如机匣烧毁。
4	危险	事件/状态极大降低飞机运行能力或安全裕度,导致飞机机组身体极度不适、工作负荷极大增加,少数乘客或客舱组严重受伤或死亡。如急剧升高。
3	较大	事件/状态会较大降低飞机运行能力或安全裕度,飞行机组会感到身体不适,并增加其工作负荷,乘客则会产身体极度不适,甚至可能受伤。如不妨碍航空器的可控性和结构完整性的推进系统故障。
2	较小	事件会轻微降低飞机运行能力或安全裕度,略微增加机组成员工作负荷,令乘客感到不适。如客舱温度太高或噪声过大。
1	无影响	事件不会对飞机和机组产生影响,但客舱乘客可能会略感不适。

(2) 确定事件发生概率指数

事件发生概率指数是通过计算相同事件在同类型机型、不同机型上的发生概率,比较得出的无量纲值,该指数从事件发生绝对概率和相对概率两方面评判事件发生的可能性。

事件发生绝对概率指数 P_s ,是在过去一段时间内,某一型号航空器、系统或部件发生一类事件的次数,与该型号航空器在相同时间段内发生的所有事件次数的比值^[8]。 P_s 与概率比值对应关系如表2所示。

表2 绝对概率指数 P_s

某事件发生次数/所有事件发生次数	绝对概率指数 P_s
(0.2,1)	5
(0.1,0.2)	4
(0.01,0.1)	3
(0.001,0.01)	2
(0,001)	1

事件相对概率指数 P_r ,是在过去一段时间内,某一型号的航空器、系统或部件发生一类事件的概率 P_1 与其它型号航空器、系统或部件在相同时间段内发生该类事件概率 P_2 的比值。表3给出 P_r 取值划分依据。

表3 事件相对发生率指数 P_r

P_1/P_2	P_r
(1.5,+∞)	5
(1,1.5)	4
1	3
(0.5,1)	2
(0,0.5)	1

定义事件发生概率指数 P_e :

$$P_e = \lfloor (P_s + P_r) / 2 \rfloor \quad (1)$$

(3) 事件风险水平

综合上述分析过程,分别得到事件的严重度指数和发生概率指数,用以表示事件风险大小。风险大小划分为三个等级:不可接受风险、可容忍风险和可接受风险。根据ICAO和其他民航风险评价矩阵标准,风险可接受性判断标准如图3所示。

得出事件风险等级后,进一步对风险等级进行排序。矩阵纵坐标表示不安全事件发生概率,横坐标表示不安全事件发生的后果,将不安全事件等级在矩阵中相应的位置点向矩阵的对角线投影,投影

距离原点越远,风险越高。如图 4 所示,事件 B 的风险等级投影 OB' 比事件 A 的风险等级的投影 OA' 长,故事件 B 的风险大。

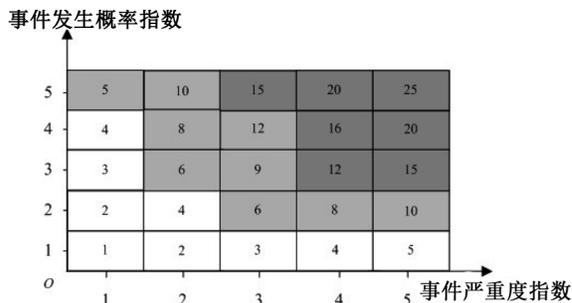


图 3 危险风险评价矩阵示例

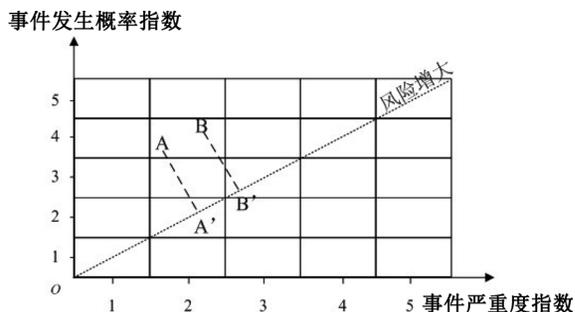


图 4 事件风险等级比较示意图

2.3 详细风险分析

详细风险分析是借助安全性分析方法,分析事件导致因素的严重程度和发生的可能性。首先分析事件对单架飞机的风险影响,确定并预测事件发生概率,针对不同类别的事件(如系统、结构或动力装置),采用适用的概率风险评估方法评估事件风险。在此基础上,计算事件对整个机队的影响程度。

(1) 单机风险分析

单机风险分析采用自下向上的逻辑,逐步确定事件(失效、故障或缺陷)对部件、子系统、系统及整机的影响,计算故障导致因素的发生概率。分析方法包括基于观测率的事件概率计算法和概率风险分析法。其采取的主要分析技术为 FMEA、FTA、SHA、SSHA 等。分析事件的影响时,应考虑到事件发生阶段,即设计、试验、制造、运行等阶段,确定事件影响范围。

计算事件发生概率时,假设小概率事件近似适用,事件发生概率等于观察到的事件数除以暴露出某问题的飞行小时数或航班数^[6]。预计事件导致因素的发生概率时,应根据导致因素服从的失效分布选择适当方法进行计算。对于隐蔽失效,即机组成员和机务维修人员在正常使用过程中不能发现

或不易发现的失效,失效的发生概率为事件实际发生概率乘以失效暴露时间。例如在飞机的每日检查中,发现在 450 000 飞行小时中存在 5 起电线束磨损事件,受影响的航空器机队每天运行 8 小时,则电线束的隐藏时间为 8 小时,即磨损电线束的工作时间为 0 小时或 8 小时,平均暴露 4 小时。则磨损电线束事件的发生概率为:

$$P(\text{磨损电线束事件}) = [5/450\ 000] \times 4 = 4.444 \times 10^{-5} \text{次/飞行小时}$$

对于故障率为其使用寿命单位函数的元件,通过威布尔分析或其它失效分布分析计算概率值,每飞行小时(或每次飞行)故障率为:

$$h(t) = (\beta/\eta)(t/\eta)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中, $h(t)$ 为时间 t 内危险发生的概率; β 为威布尔模量; t 为系统/产品服役寿命(或服役时间); η 为威布尔特征寿命。

当失效是由多因素导致时,在工程分析、实验数据等有效数据的支撑下,应根据观测到的数据建立失效模式模型,运用蒙特卡罗或其它仿真方法估计事件导致因素的失效概率。

(2) 机队风险评估

机队风险评估是所评估的单个风险对整个机队的影响程度,计算机队在 12 个月内或直至机队退役前的总故障数。当飞机存在的风险不会受飞机或飞机部件使用时间的影响时,每架飞机每飞行小时或每飞行班次都具有相同的风险概率。此时,机队的风险仅被看作是单个飞机风险和机队暴露于该风险时间的函数,即:

$$\text{机队风险} = \text{部件失效概率} \times \text{部件数量} \times \text{计划服役时间}$$

当飞机存在的风险与零部件使用时间有关时,产品故障率是使用寿命函数,则首先采用威布尔分析或其它失效分布函数计算概率值,确定机队中每个产品的使用时间以及实施改正措施计划前零件的服役时间,根据上述三个参数计算累积失效概率,即为整个机队的风险。

例如某架飞机出现燃油管接头故障,其所在机队由 10 架飞机组成,且每架飞机的燃油管接头的失效率和使用寿命均不同。通过分别计算每个接头的失效概率值,将接头每小时的风险乘以预计改正措施之前仍需服役的时间,即得到机队采取改正措施前的风险。如表 4 所示,得出的机队风

(下转第 72 页)

量档案,意在减少设计中出现的低级错误,并从道德和诚信的角度树立第一次就将事情做对的零缺陷理念,落实“精湛设计、精细制造、精诚服务、精益求精”的质量方针。

4 结束语

民用飞机设计质量管理之路任重而道远,在建立质量管理体系的基础上,以 PDCA 为核心,运用零缺陷管理之道、AS9100 管理之器,将纠错管理模式

逐步转变为预防管理模式,应用先进的质量管理工具和方法,打造出适用于我国民机设计体制下的质量管理模式是我们质量人为之奋斗的目标。

参考文献:

- [1] AS9100C - 2009. Quality Management Systems Requirements for Aviation Space and Defense Organizations.
- [2] GB/Z19579-2004, 卓越绩效评价准则实施指南.
- [3] 杨钢. 零缺陷大道[M]. 北京:北京大学出版社, 2006.

(上接第 32 页)

险值为 0.329 3 可理解为在改正措施实施期间,整个机队预计发生事件的数量,即在改正措施实施期间约有 33% 的接头发生失效。

3 结论

本文以风险管理理论为基础,分析了民机持续适航过程中不安全事件的来源和报告模式。针对

民机持续适航阶段的航空器失效事件,初步建立持续适航阶段民机不安全事件风险评估程序,并给出每一步骤所采用的方法。该程序的建立,为运输类飞机安全性评估提供了有效的技术手段。通过初步判断事件风险,可以迅速判断航空器、系统或部件的风险状态,当发现事件风险处于不可容忍或可容忍区域时,需制定相应改正措施,降低事件风险,保证航空器始终处于适航风险水平内。

表 4 机队风险计算表

序号	接头使用时间	改正措施实施前接头失效概率(每小时)	计划使用时间	改正措施实施后接头失效概率(每小时)	平均失效概率(每小时) (C+E)/2	单件累计风险 D×F
A	B	C	D	E	F	G
1	3 900	5.404×10^{-6}	2 000	9.257×10^{-6}	7.330×10^{-6}	0.014 7
2	5 000	7.465×10^{-6}	2 000	1.156×10^{-5}	9.513×10^{-6}	0.019 0
3	7 000	1.156×10^{-5}	2 000	1.603×10^{-5}	1.379×10^{-5}	0.027 6
4	9 400	1.696×10^{-5}	2 000	2.179×10^{-5}	1.938×10^{-5}	0.038 8
5	10 200	1.886×10^{-5}	2 000	2.380×10^{-5}	2.133×10^{-5}	0.042 7
6	14 900	3.087×10^{-5}	1 000	3.359×10^{-5}	3.223×10^{-5}	0.032 2
7	15 000	3.114×10^{-5}	1 000	3.386×10^{-5}	3.250×10^{-5}	0.032 5
8	22 000	5.123×10^{-5}	1 000	5.427×10^{-5}	5.275×10^{-5}	0.052 8
9	25 000	6.049×10^{-5}	500	6.207×10^{-5}	6.128×10^{-5}	0.030 6
10	29 800	7.600×10^{-5}	500	7.766×10^{-5}	7.683×10^{-5}	0.038 4
机队风险 = $\sum G$						0.329 3

参考文献:

- [1] 曾亮. 多层次模糊评估法在民航不安全事件风险评估中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(1): 131-138.
- [2] 韦艺, 陈新锋. 使用困难报告安全性风险评估方法研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(2): 42-46.
- [3] 杨昌其, 微光兴. 空管不安全事件危险等级的量化评估方法[J]. 西安交通大学学报, 2006, 41(6): 753-757.
- [4] 葛志浩, 徐浩军, 刘琳, 等. 飞行事故概率模型与风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(2): 162-165.
- [5] AMC 20-8, Occurrence Reporting[S].

[6] ARP 5150, Safety Assessment of Transport Airplanes in Commercial Service[S].

[7] Doc 9859, Safety Management Manual(SMM)[S].

[8] 龚庆祥, 顾振中, 宋占成, 等. 飞机设计手册(第 20 分册)[M]. 北京:航空工业出版社, 1999.

[9] CCAR 396R2, 民用航空安全信息管理规定[S].

[10] Clifton A. Ericson. Hazard analysis technique for system safety[M]. Fredericksburg, Virginia: John Wiley & Sons, Inc, 2005.