

文章编号: 1674-8190(2023)06-143-10

# 飞机空调系统动态安全分析

孙晨赫<sup>1</sup>, 曹湘玲<sup>2</sup>

(1. 上海民航职业技术学院 民航维修学院, 上海 200237)

(2. 上海民航职业技术学院 民航运输学院, 上海 200237)

**摘要:** 目前, 飞机空调系统的安全性分析多基于固定故障状态, 未考虑故障动态发展与变化, 且仅能进行定性分析, 因此有必要对飞机空调系统开展精准安全性分析。基于空调系统 FMEA 中的根故障参数, 借助 Markov 时间序列求解故障横向转移路径, 利用联合概率分布及 Bayes 算法求解故障等级与概率, 实现横向定性又定量的安全性分析; 运用 Monte Carlo 仿真求解故障纵向升级路径、故障等级与概率, 实现纵向定性又定量的安全性分析。结果表明: 动态定性又定量的安全性分析可以精准地判定飞机空调系统的安全性、故障状态下的放行结论及放行要求, 具有较好的工程应用价值。

**关键词:** 空调系统; 安全性; Markov; Monte Carlo; Bayes; 故障转移; 故障升级

**中图分类号:** V245.3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.16

## Dynamic safety analysis of aircraft air conditioning system

SUN Chenhe<sup>1</sup>, CAO Xiangling<sup>2</sup>

(1. School of Civil Aviation Maintenance, Shanghai Civil Aviation College, Shanghai 200237, China)

(2. School of Civil Aviation Transportation, Shanghai Civil Aviation College, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** At present, the safety analysis of aircraft air conditioning system is based on the fixed fault state, without considering the dynamic development and change of the fault. At the same time, only qualitative analysis can be carried out. It is necessary to carry out accurate safety analysis on aircraft air conditioning system. Based on the root fault parameters in the FMEA of the air conditioning system, Markov time series is used to solve the lateral fault transfer path, and the joint probability distribution and Bayes algorithm are used to solve the fault level and probability, thus realizing the lateral qualitative and quantitative safety analysis; The Monte Carlo simulation is used to solve the longitudinal upgrading path, fault level and probability of the fault, and the longitudinal qualitative and quantitative security analysis is realized. The results show that the dynamic quantitative and qualitative safety analysis can accurately determine the safety of the aircraft air conditioning system, the release conclusion and the release requirements under fault conditions, and has good engineering application value.

**Key words:** air conditioning system; safety; Markov; Monte Carlo; Bayes; fail-over; failure escalation

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-11-18

基金项目: 上海民航职业技术学院 2022 年科研项目(XJKT-2022-36)

通信作者: 孙晨赫, sunchenhetx@163.com

引用格式: 孙晨赫, 曹湘玲. 飞机空调系统动态安全分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 143-152.

SUN Chenhe, CAO Xiangling. Dynamic safety analysis of aircraft air conditioning system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 143-152. (in Chinese)

## 0 引言

飞机系统安全性的判定是飞机设计、制造、运营等工作开展的基础。基于故障、失效的系统安全性分析,可用于指导运营人在符合适航标准和运行要求的基础上,在某些设备缺失或者不工作的情况下安全放行飞机,提升航空器的利用率。要确定哪些失效、故障的系统或部件满足安全标准,需要在对飞机各个系统和部件进行故障分析、故障预测的基础上,开展安全性判定,并确定其最终故障是否影响飞机的正常放行。飞机空调系统的安全状态对飞机的安全运行有着重要影响,空调系统故障可能导致座舱失去新鲜空气、座舱失压、超压并引发乘员身体不适,甚至触发紧急下降等严重危害。但并非所有的空调系统故障都会导致严重的安全危害,在发生某些故障时,飞机在满足一定放行条件的情况下,依然可以安全运行。

系统安全性可通过故障危害程度、故障可能性及故障发展路径等关键参数进行判定。K. Jenab等<sup>[1]</sup>提出了一种基于流程图的方法来计算飞机空调系统失效时间,用于制定故障限制和维护策略;M. Gerdes<sup>[2]</sup>提出了一种基于实测数据的飞机空调系统状态预测方法,通过迭代算法,逐点进行预测;王辉等<sup>[3]</sup>利用时间序列算法,对飞机空调系统故障进行预测研究;方崧源等<sup>[4]</sup>针对某型飞机空调系统故障,用模拟工作情况的实验排故方法分析解决常见故障;石旭东等<sup>[5]</sup>基于 AMESim-Simulink 联合仿真平台,模拟飞行过程中空调系统组件性能动态变化过程,并对典型故障(预冷器泄漏、预冷器空气活门卡死、压力传感器冲击、冲压空气进气作动筒卡死等)进行模拟,分析了空调组件性能的变化过程;Chen Lu等<sup>[6]</sup>提出了一种基于自适应阈值和参数提取(ATPE)的飞机空调系统故障诊断方法,实现了对飞机空调系统控制元件的故障检测和隔离。

上述研究主要借助了故障树分析(FTA)<sup>[7-8]</sup>、功能危险性评估(FHA)<sup>[9]</sup>、故障模式与影响分析(FMEA)<sup>[10-11]</sup>、系统安全性评估(SSA)<sup>[12]</sup>等评估方法,分别给出了故障逻辑关系、功能危害等级、故障模式与故障影响以及安全性结论。不足的是,

上述分析方法都是基于某一确定故障,对动态转移和升级的故障无法做出精准判定,而实际运行时,系统与部件的故障状态一直在动态变化。故障的动态变化主要有两个方向:故障转移和故障升级。同时,FMEA、FTA及SSA都是定性的安全性分析方法,仅能判断故障发生等级,无法分析故障发生概率。而在系统实际运行过程中,低概率的严重故障和大概率轻微故障都足以触发整个系统的故障,因此需要对系统故障进行既定性又定量的安全性分析。

目前对飞机空调系统的安全性分析,主要基于确定的故障、确定的故障升级路径,并未考虑故障转移、故障发展路径的可能变化;同时对故障升级带来的安全性影响评判上仅进行了定性分析,未实现定量分析,即只考虑了故障等级而未对故障的可能性进行准确界定。故障对系统的安全性影响由故障危害等级、故障概率共同决定,因此需要进行定性又定量的飞机空调系统动态安全性判定。

根据空调系统各部件根故障动态变化路径,把空调系统安全性分析分为2个层次:level-1层的故障横向转移安全性分析,level-2层的故障纵向升级安全性分析。本文通过Markov算法<sup>[13-14]</sup>分析转移故障的概率及危害等级,使用Monte Carlo<sup>[15-17]</sup>仿真分析升级故障的概率及危害等级,给出空调系统在各类故障、失效状态下飞机的放行结果。

## 1 安全性适航要求

根据飞机设计及适航要求,飞机系统及部件对飞机安全性的影响需要按照故障及危害等级不同而满足一定的适航安全标准参数 $\phi(i)$ ,这个条件也称为飞机安全性门限值<sup>[18]</sup>,飞机设计中所有系统以及部件都要满足如下门限值:

$$\phi(i) \leq \begin{cases} 1 \times 10^{-9} & (\text{I类故障}) \\ 1 \times 10^{-7} & (\text{II类故障}) \\ 1 \times 10^{-5} & (\text{III类故障}) \\ 1 \times 10^{-3} & (\text{IV类故障}) \\ \text{no limitation} & (\text{V类故障}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\phi(i)$ 为满足飞机安全性的最低要求标准。

各飞机设备和系统必须明确证明能满足  $\phi(i)$ , 并尽可能达到更高的安全性参数标准。

## 2 转移故障安全性

飞机的故障状况随着时间在动态地变化,飞机系统和部件在某一时刻的状态仅仅取决于前一时刻的状态,这种性质称为马尔可夫特性。要精准地分析飞机转移到的另一个根故障的安全性,必须以动态变化的时间序列(即马尔可夫序列)下的根故障作为分析对象。以流量控制活门(FCV)为例,对于任意非负整数  $k$  组成的马尔可夫时间序列  $\{t_k, k \geq 0\}$ , 在  $k$  时刻 FCV 的故障状态为  $s_i$ , 故障  $s_i$  发生的概率为  $p_i(t_k)(i=1, 2, \dots, M)$ , 其中  $M$  是部件 FCV 所有的故障状态数; 在  $k+1$  时刻 FCV 的故障状态为  $s_j$ , 故障  $s_j$  发生的概率为  $p_j(t_{k+1})$ 。从根故障  $s_i$  转移到根故障  $s_j$  的故障概率为  $p_{ij}(k)$ 。根据马尔可夫性质可以得到:

$$p_{ij}(k) = p(t_{k+1} = s_j | t_k = s_i) \geq 0 \quad (2)$$

式中:  $p_{ij}(k)$  为马尔可夫链的一步转移概率, 也即 FCV 从  $s_i$  状态转移到  $s_j$  的概率。

根据 FMEA 分析数据, 可得 FCV 根故障如表 1 所示。

表 1 FCV 的根故障  
Table 1 FCV root fault

故障编码	故障状态编号	故障状态	故障等级	故障提示	故障是否升级
1	$s_1$	失效在关位-A	IV	是	是
2	$s_2$	失效在开位-B	IV	是	是
3	$s_3$	内部泄漏-C	IV	否	否
4	$s_4$	外部泄漏-D	IV	是	是
5	$s_5$	丧失控制功能-E	IV	是	是
6	$s_6$	示值偏高-F	IV	否	否
7	$s_7$	示值偏低-G	IV	否	否

不同时刻, 不同初始根故障, 下一个时刻转移到另一个根故障及概率各不相同。综合 FCV 所有可能触发的根故障, 可以得到 FCV 从  $t_k$  时刻到  $t_{k+1}$  时刻根故障横向转移矩阵, 如表 2 所示。

表 2 FCV 根故障转移矩阵  
Table 2 FCV root fault state transition matrix

列号	行号							
	1	2	3	4	5	6	7	
1	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$	$p_{14}$	$p_{15}$	$p_{16}$	$p_{17}$	$\sum_{j=1}^7 p_{1j}$
2	$p_{21}$	$p_{22}$	$p_{23}$	$p_{24}$	$p_{25}$	$p_{26}$	$p_{27}$	$\sum_{j=1}^7 p_{2j}$
3	$p_{31}$	$p_{32}$	$p_{33}$	$p_{34}$	$p_{35}$	$p_{36}$	$p_{37}$	$\sum_{j=1}^7 p_{3j}$
4	$p_{41}$	$p_{42}$	$p_{43}$	$p_{44}$	$p_{45}$	$p_{46}$	$p_{47}$	$\sum_{j=1}^7 p_{4j}$
5	$p_{51}$	$p_{52}$	$p_{53}$	$p_{54}$	$p_{55}$	$p_{56}$	$p_{57}$	$\sum_{j=1}^7 p_{5j}$
6	$p_{61}$	$p_{62}$	$p_{63}$	$p_{64}$	$p_{65}$	$p_{66}$	$p_{67}$	$\sum_{j=1}^7 p_{6j}$
7	$p_{71}$	$p_{72}$	$p_{73}$	$p_{74}$	$p_{75}$	$p_{76}$	$p_{77}$	$\sum_{j=1}^7 p_{7j}$

根据 FMEA 分析报告数据, FCV 根故障概率  $p_i = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\} = \{10.03 \times 10^{-6}, 9.78 \times 10^{-6}, 19.36 \times 10^{-6}, 0.52 \times 10^{-6}, 24.17 \times 10^{-6}, 0.24 \times 10^{-6}, 29.76 \times 10^{-6}\}$

以 FCV 的第 4 个根故障为例, FCV 外部泄漏的最大故障转移概率为:  $\max\{p_{41}, p_{42}, p_{43}, p_{45}, p_{46}, p_{47}\}$ 。根据式(2)可得, 在任意时刻  $p_{41} = p(t_{k+1} = s_1 | t_k = s_4) \geq 0$ ,  $p_{41}$  仅受故障状态  $s_1$  和  $s_4$  影响, 通过贝叶斯(Bayes)<sup>[19-20]</sup>算法可得:

$$p_{41} = p(s_1 | s_4) = \frac{p(s_4 | s_1) \times p(s_4)}{p(s_1)} \quad (3)$$

设有  $N$  条故障路径会触发 FCV 第 1 个故障,  $p_{41}$  仅是其中一条, 则可得:

$$p_{41} < \sum_{j=1}^N p_{j1} = p(s_1) \quad (4)$$

表明在出现故障 4 的基础上再出现故障 1 的概率明显小于故障 1 的触发概率。把 FCV 根故障概率参数带入式(4), 可得  $p_{41} < 10^{-5}$ 。综上同理可得:

$$\max\{p_{41}, p_{42}, p_{43}, p_{45}, p_{46}, p_{47}\} < 10^{-5} \quad (5)$$

故障 4 转移到故障 1 的故障分布,是两个随机变量  $p(s_4), p(s_1)$  组成的随机向量的概率分布,属于联合概率分布,可表示为  $p(s_4, s_1)$ ,根据联合概率与贝叶斯条件概率关系,可得:

$$p(s_4, s_1) = p(s_1|s_4) \times p(s_4) \quad (6)$$

把式(4)带入式(6),可得:

$$p(s_4, s_1) < p(s_1) \times p(s_4) = 5 \times 10^{-12} \quad (7)$$

把式(7)带入式(1),可得部件 FCV 的 4 号根故障转移到 1 号根故障满足安全性标准要求。重复上述步骤,可得 FCV 根故障之间状态转移都满足  $\phi(i)$  限定。

重复以上算法计算 FCV 的 1~3 号、5~7 号根故障的横向转移故障发生概率:

$$p_{ij} = \begin{cases} [0, p_i \times p_j] & (i \neq j) \\ [1 - p_i \times p_j, 1] & (i = j) \end{cases} \quad (8)$$

综上,不考虑故障升级的情况下,FCV 根故障的横向转移故障概率满足适航安全门限  $\phi(i)$  要求。

FCV 不同根故障间的故障转移属于同一个部件之间的故障状态动态变化,在某些情况下,不同的部件之间也存在故障转移的可能。故障转移的本质<sup>[21]</sup>是物质、能量、信息之间的交换,具体的转移过程如图 1 所示。

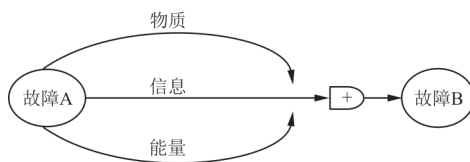


图 1 故障转移的过程

Fig. 1 The process of failover

故障要发生转移,在物质、能量、信息这 3 个要素中至少要有 1 种存在交换。对于典型的机电类设备——飞机空调系统部件,不存在物质交换基础和信息传输电路,因此不同部件间的故障转移仅由能量传输导致。能量传输有传导、对流和辐射 3 种模式,空调系统部件不具备对流和辐射的条件,只能通过传导的形式传输能量。能量传导是一种通过物理接触,实现能量交换的现象,空调系统部件互相独立,无物理接触。据此可建立空调部件间故障转移判断矩阵,如表 3 所示。

表 3 部件间故障转移判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of inter component fail-over

部件编号	部件名称	传输路径			是否转移
		物质	信息	能量	
1	流量控制活门(FCV)	否	否	否	否
2	应急冲压空气作动器(ERAIA)	否	否	否	否
3	地面接头(LPGC)	否	否	否	否
4	货舱关断活门(BBSOV)	否	否	否	否
5	再循环风扇(RFAN)	否	否	否	否
6	电子设备风扇(AVS FAN)	否	否	否	否
7	电子设备通风活门(AVV)	否	否	否	否
8	配平空气活门(TAV)	否	否	否	否
9	配平空气压力调节活门(TAPRV)	否	否	否	否
10	飞行员脚部加热器	否	否	否	否

基于马尔可夫时间序列,对空调系统的其余部件故障,按照上述分析方法,逐项进行分析,并带入式(1)进行验证,可得到空调系统 level-1 层横向转移故障安全性分析结论,如表 4 所示。

表 4 空调系统横向故障转移安全分析结论

Table 4 Conclusion of fail-over safety analysis of air conditioning system

部件编号	部件名称	故障等级	故障提示	故障转移安全性	故障是否升级
1	流量控制活门(FCV)	IV	是	是	是
2	应急冲压空气作动器(ERAIA)	IV	是	是	是
3	地面接头(LPGC)	IV	是	是	是
4	货舱关断活门(BBSOV)	IV	是	是	是
5	再循环风扇(RFAN)	IV	是	是	是
6	电子设备风扇(AVS FAN)	IV	是	是	是
7	电子设备通风活门(AVV)	IV	是	是	是
8	配平空气活门(TAV)	IV	是	是	是
9	配平空气压力调节活门(TAPRV)	IV	是	是	是
10	飞行员脚部加热器	IV	否	是	否

### 3 升级故障安全性

对于发生故障升级的根故障而言,通过马尔可夫分析可以得到其转移到另一个根故障的概

率,但无法描述根故障与下一个升级故障之间的逻辑关系以及故障转移路径,故无法确定当前根故障对飞机造成的最终危害。为了确定根故障对飞机的最终危害,通常通过遍历故障树分析法<sup>[22]</sup>进行分析,但是遍历分析都是基于某一特定故障或某条特定故障升级路径,当故障动态变化,故障升级路径交叉多变时,常规 FTA 故障分析法难以继。

同时,常规 FTA 方法分析升级故障时,无法得到升级故障准确的触发概率,因而无法对升级故

障做出准确的安全性判定。为了得到准确的升级故障概率,需要对全部根故障在其故障发生周期内的工作状态进行分析验证,分析验证的次数越多,验证结果越接近真实值。传统的数理方法无法解析这么多次且如此长时间序列的验证问题,为此,应用 Monte Carlo 仿真分析法对空调系统部件的升级故障进行全时段、全故障状态仿真分析。飞机空调系统具有通风、温控和流量调节功能。空调系统部件与功能之间的逻辑关系如图 2 所示。

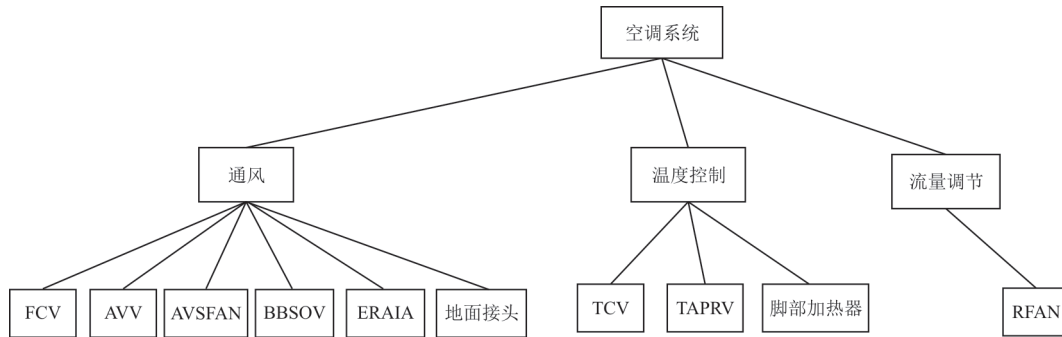


图 2 空调系统部件与功能之间的逻辑关系

Fig. 2 Logical relationship between components and functions of an air conditioning system

### 3.1 Monte Carlo 分析算法

设部件的失效分布函数<sup>[23-24]</sup>为  $f_{ij}(t)$ ,  $\lambda_{ij}$  为失效分布的参数,  $i$  为故障部件编号,

$i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ,  $j$  为部件  $i$  的故障序号, 根据 FMEA 分析数据, 部件失效分布参数如表 5 所示。

表 5 空调系统部件失效分布参数表

Table 5 Component failure distribution parameters of the air conditioner

部件编号	部件	失效概率密度分布 $f_{ij}(t)$	$f_{ij}(t)$ 的分布参数 $(1/\lambda)$
1	FCV	Index	$\{0.99, 1.02, 0.52, 19.23, 0.41, 41.67, 0.34\} \times 10^5 \text{ h}$
2	ERAIA	Index	$\{3.33, 3.33, 3.33, 3.33\} \times 10^5 \text{ h}$
3	LPGC	Index	$\{10, 2, 0.14\} \times 10^6 \text{ h}$
4	BBSOV	Index	$\{1.67, 1.67, 25.33, 25.33, 63.25\} \times 10^5 \text{ h}$
5	RFAN	Index	$\{0.31, 1.13, 80.16, 77.32, 93.25\} \times 10^5 \text{ h}$
6	AVS FAN	Index	$\{0.43, 1.27, 90.31, 80.32, 106.47, 68.05, 76.32\} \times 10^5 \text{ h}$
7	AVV	Index	$\{0.87, 32.67, 53.62, 1.43, 26.56, 41.29\} \times 10^5 \text{ h}$
8	TAV	Index	$\{0.53, 143.12, 38.76, 1.86, 37.26, 67.51\} \times 10^5 \text{ h}$
9	TAPRV	Index	$\{0.87, 4.37, 1.21, 5.32, 1.46, 0.92, 5.76, 0.34\} \times 10^5 \text{ h}$

仿真算法及逻辑:

1) 为了模拟飞机生命周期的故障状态<sup>[25]</sup>, 设定最大工作时间  $t_{\max} = 10^6 \text{ h}$ , 仿真的推进步长为 3 h, 时间间隔为 1 h。

2) 设定的仿真样本个数<sup>[26]</sup>  $N_s = 2.5 \times 10^5$ 。

3) 仿真运算逻辑: 根据 FMEA 中的根故障状态, 基于 FTA 升级路径, 分别建立部件 1~9 仿真逻辑树<sup>[27]</sup>与根故障代码, 其中底层是根故障, 终点

是根故障的下一个升级故障。

4) 故障结构函数为  $\varphi\{x(t)\}$ , 其中  $x$  是部件的故障状态, 若部件的故障能够向上一个层级升级, 则此时  $y = \varphi\{x(t)\} = 1$ , 代表系统故障, 一次仿真结束, 对应的部件故障事件计数加 1; 若部件故障无升级路径, 则退出本次仿真, 并开始下一次故障仿真。

5) 在第  $N$  次仿真运行中, 第  $i$  个部件故障  $z_{ij}$  的失效时间  $t_{ijN}$  由失效分布密度函数  $f_{ij}(t)$  抽样产生, 因而在第  $N$  次仿真中 9 个部件的失效时间抽样值为  $t_{1jN}, t_{2jN}, t_{3jN}, t_{4jN}, t_{5jN}, t_{6jN}, t_{7jN}, t_{8jN}, t_{9jN}$ 。

6) 在每次仿真运行中, 按照仿真逻辑树逻辑, 利用结构函数来判断升级故障发生时间  $t_{ijN}$ 。

7) 重复上述过程直到仿真运行  $N_s$  次。

8) 借助 Python 语言, 其转化逻辑如图 3 所示。

```
>>> from random import *
>>> from math import *
>>> times = 250000
>>> count = 0
>>> for i in range(times):
...     x = uniform(0,1)
...     y = uniform(0,1)
...     if x*y>0:
...         count += 1
... MTBF = count*lambda/times
```

图 3 Python 转化逻辑

Fig. 3 Conversion logical process by Python

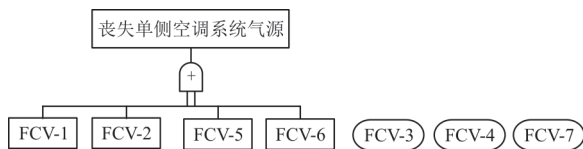
### 3.2 仿真故障树

根故障代码及状态如表 6 所示, 仿真逻辑树如图 4 所示。

表 6 根故障代码及状态

Table 6 Root fault codes and status

故障代码	故障状态	故障代码	故障状态	故障代码	故障状态
FCV-1	失效在开位	BBSOV-4	内部泄漏	AVV-1	失效在开位
FCV-2	失效在关位	BBSOV-5	位置信息失效	AVV-2	失效在关位
FCV-3	内部泄漏	RFAN-1	未检测到的失效	AVV-3	显著的外部泄漏
FCV-4	示值偏高	RFAN-2	鼓风性能下降	AVV-4	内部泄漏
FCV-5	外部泄漏	RFAN-3	单向活门失效在开位	AVV-5	位置信息失效, 全关位置微调失效
FCV-6	丧失控制能力	RFAN-4	电子保护失效	AVV-6	位置信息失效, 未全关位置微调失效
FCV-7	示值偏低	RFAN-5	单向活门失效在关位	TAV-1	显著外部泄漏
ERAIA-1	失效在关位	RFAN-6	鼓风失效	TAV-2	失效在关位
ERAIA-2	失效在开位	AVSFAN-1	鼓风性能下降	TAV-3	失效在开位
ERAIA-3	位置指示失效	AVSFAN-2	单向活门失效	TAV-4	内部泄漏
LGPC-1	显著泄漏	AVSFAN-3	电子保护失效	TAV-5	位置信息失效
LGPC-2	失效在关位	AVSFAN-4	电子保护下降	TAPRV-1	调压偏低
LGPC-3	轻微泄漏	AVSFAN-5	过热保护丧失	TAPRV-2	调压偏高
BBSOV-1	失效在开位	AVSFAN-6	机械保护丧失	TAPRV-3	显著的外部泄漏
BBSOV-2	失效在关位	AVSFAN-7	鼓风失效	TAPRV-4	失效在开位
BBSOV-3	显著外部泄漏	AVSFAN-8	排风失效	TAPRV-5	失效在关位



(a) 流量控制活门故障逻辑



(b) 应急冲压空气作动器故障逻辑

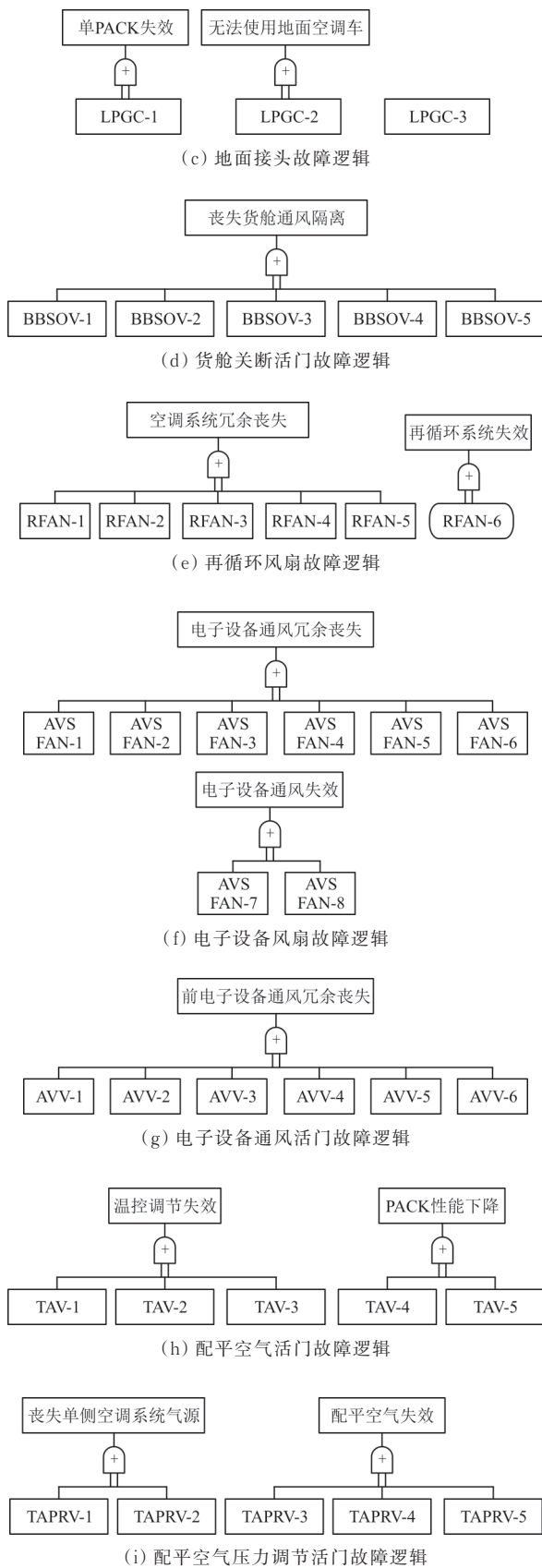


图 4 仿真逻辑树

Fig. 4 Simulation logic tree

### 3.3 结果分析

将表 5 中的各部件根故障参数输入训练好的基于 Python 环境的 Monte Carlo 仿真环境进行故障分析,运行程序后,得到空调系统 1~9 号部件的升级故障概率  $p_i(t)$ ,如表 7 所示。带入式(1)可知其满足适航安全标准门限  $\phi(i)$ ,表明空调系统 1~9 号部件故障的危害程度及触发频次处于可接受范围。

表 7 空调系统部件最终故障

Table 7 Final failure of air conditioning system components

部件	最终升级故障	最终升级故障发生概率 $p_i(t)$	等级
FCV	丧失单侧空调系统气源	$4.32 \times 10^{-5}$	IV
ERAIA	丧失应急通风功能	$1.12 \times 10^{-5}$	IV
LPGC	丧失单侧空调系统气源	$21.83 \times 10^{-6}$	IV
BBSOV	丧失货舱通风和货舱隔离功能	$5.21 \times 10^{-5}$	IV
RFAN	丧失空调系统冗余功能	$31.87 \times 10^{-5}$	IV
AVS FAN	电子设备舱通风冗余丧失	$56.13 \times 10^{-5}$	IV
AVV	丧失电子设备通风功能的冗余	$71.02 \times 10^{-6}$	IV
TAV	温度控制系统失效	$26.39 \times 10^{-6}$	IV
TAPRV	丧失单侧空调系统气源	$13.24 \times 10^{-6}$	IV
	配平空气失效	$41.57 \times 10^{-6}$	IV

虽然空调系统 1~9 号部件发生故障后,还能满足适航安全要求,但是会对飞机的正常运行造成影响,需要增加额外的运行限制,是否放行飞机还需按照运行要求进行综合考虑。例如,1套FCV失效会导致对应侧空调组件(PACK)失效,进而导致飞机的理论升限降至 31 000 ft(1 ft=0.304 8 m)以下。此外,相同部件,故障数量不同也会产生不同的影响。例如,单 TAPRV 失效时,空调系统会丧失单侧气源,温度控制功能降级,导致系统冗余度降低;而双 TAPRV 失效则会导致整个空调系统失效。最后还需考虑故障对飞机特定状态,特别是应急状态的运行影响。因此结合 CCAR-121 部运行规范<sup>[28]</sup>及实际运行要求,可得空调系统故障放行结论及放行要求,如表 8 所示。在飞机维护中,若发现表 8 中不可放行的故障,需要立即安排维修;可放行的故障在一定的期限<sup>[29]</sup>内可以延后修理。

表 8 空调系统故障放行结论及放行条件  
Table 8 Conclusions and requirements for air conditioning system failure release

部件	安装数量	失效数量	是否存在特殊运行要求	是否放行	放行条件/拒绝放行原因
FCV	2	1	否	是	运行高度小于 31 000 ft
		2	否	否	座舱无法增压
ERAIA	1	1	是	否	影响应急通风
LPGC	1	1	否	是	不可使用地面空调车
BBSOV	2	1	否	是	货舱不可装载活物
		2	否	是	货舱不可装载活物
RFAN	2	1	否	是	空调系统丧失冗余度
		2	否	是	空调系统丧失冗余度
AVS FAN	2	1	否	是	另外一套工作正常 AVV 不能坏
		2	否	否	电子舱过热
AVV	1	1	是	否	影响应急条件下电子舱通风
TAV	3	1	否	是	丧失温度控制
		2	否	是	丧失温度控制
		3	否	是	丧失温度控制
TAPRV	2	1	否	是	运行高度小于 31 000 ft
		2	否	否	座舱无法增压

## 4 结 论

1) 本文所运用的空调系统动态安全性分析方法,不基于固定故障,充分考虑了故障的动态发展与变化中的转移、升级两个维度,更加符合实际故障状态。

2) 实现了定性又定量的空调系统安全性判定,既判定了故障的危害等级,又求解了故障发生的概率,提升了安全性分析的精准度。

3) 通过动态安全性分析,得到了空调系统故障条件下飞机的放行结论及放行条件。飞机放行与故障数量、特殊的运行要求相关。不可放行的故障需要立即维修,可放行的故障需按照规定期限完成维修。

### 参考文献

- [1] JENAB K, RASHIDI K. Operational reliability assessment of an aircraft environmental control system [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 94(2): 456-462.
- [2] GERDES M. Decision trees and genetic algorithms for condition monitoring forecasting of aircraft air conditioning [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(12): 5021-5026.
- [3] 王辉, 齐亚东. 飞机空调系统频发故障模型构建及预测 [J]. 航空维修与工程, 2017(3): 39-43.  
WANG Hui, QI Yadong. Modeling and forecasting frequent fault of aircraft air conditioning system [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2017(3): 39-43. (in Chinese)
- [4] 方崑源, 谌凯欣, 李伟, 等. 某型飞机空调系统故障的实验排除分析 [J]. 装备制造技术, 2015(5): 146-147.  
FANG Weiyuan, CHEN Kaixin, LI Wei, et al. Experimental analysis of air conditioning system failure of an aircraft [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(5): 146-147. (in Chinese)
- [5] 石旭东, 蒋贵嘉, 张宇, 等. 基于联合仿真的飞机空调系统故障影响 [J]. 航空学报, 2020, 41(8): 295-303.  
SHI Xudong, JIANG Guijia, ZHANG Yu, et al. Fault influence of aircraft air conditioning system based on joint simulation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 295-303. (in Chinese)
- [6] CHEN Lu, CHENG Yujie, LIU Hongmei, et al. An ap-



- proach to fault detection and isolation for control components in the aircraft environmental control system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, 2014, 228(7): 1202-1214.
- [7] 陈洪转, 赵爱佳, 李腾蛟, 等. 基于故障树的复杂装备模糊贝叶斯网络推理故障诊断[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(5): 1250-1251.  
CHEN Hongzhuang, ZHAO Aijia, LI Tengjiao, et al. Fuzzy Bayesian network inference for fault diagnosis of complex equipment based on fault tree[J]. System Engineering and Electronics, 2021, 43(5): 1250-1251. (in Chinese)
- [8] 李小彪, 马庆岩. 航空发动机高压转子转速摆动故障分析与排除[J]. 航空发动机, 2021, 47(10): 63-64.  
LI Xiaobiao, MA Qingyan. Analysis and elimination of high pressure rotor speed swing fault of aero-engine[J]. Aeroengine, 2021, 47(10): 63-64. (in Chinese)
- [9] 肖女娥, 闫芳, 王鹏. 基于安全论证的民机机载系统安全性评估[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(12): 73-75.  
XIAO Nyu'e, YAN Fang, WANG Peng. Safety assessment of civil aircraft airborne system based on safety demonstration[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(12): 73-75. (in Chinese)
- [10] 李冰月, 孙建红. 基于FMEA的飞机空调系统故障诊断与仿真[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 588-590.  
LI Bingyue, SUN Jianhong. Fault diagnosis and simulation of aircraft air conditioning system based on FMEA[J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2017, 37(3): 588-590. (in Chinese)
- [11] 李贺. FMEA在民用飞机研制中的应用研究[J]. 质量与可靠性, 2021(1): 11-15.  
LI He. Application of FMEA in civil aircraft development[J]. Quality and Reliability, 2021(1): 11-15. (in Chinese)
- [12] 王祥. 面向持续适航的民机系统安全性分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
WANG Xiang. Research on safety analysis technology of civil aircraft system for continuous airworthiness[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [13] 陶长琪. 决策理论与方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2010: 160-164.  
TAO Changqi. Decision theory and method[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2010: 160-164. (in Chinese)
- [14] 陈雯, 吕王勇, 李思奇, 等. 两种马尔可夫链状态转移概率矩阵的估计与比较[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(8): 218-220.  
CHEN Wen, LYU Wangyong, LI Siqi, et al. Estimation and comparison of state transition probability matrices for two Markov chains[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(8): 218-220. (in Chinese)
- [15] FAN Yonglei, CHEN Guoguang. Application of Monte Carlo method in rudder control precision[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6(4): 378-379.
- [16] ESTÉBANEZ L R, SHEHAB E, SYDOR P, et al. An integrated aerospace requirement setting and risk analysis tool for life cycle cost reduction and system design improvement[J]. Procedia CIRP (The International Academy for Production Engineering), 2015, 38: 78-83.
- [17] WENSKY T, WINKLER L, FRIEDRICHS J. Environmental influences on engine performance degradation: GT2010-22748[R]. UK: Turbo Expo, Power for Land, Sea, and Air, 2010.
- [18] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-1309[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard for transport aircraft: CCAR-25-1309[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [19] YUN Taoli, XIAO Ninghe, JIAN Shuai. Risk analysis and maintenance decision making of natural gas pipelines with external corrosion based on Bayesian network[J]. Petroleum Science, 2022, 19(3): 1251-1253.
- [20] WANG Lihua, CUI Yahui, ZHANG Fengqi, et al. Stochastic speed prediction for connected vehicles using improved Bayesian networks with back propagation[J]. Science China(Technological Sciences), 2022, 65(7): 1525-1527.
- [21] 柴毅, 张可, 毛永芳, 等. 动态系统运行安全性分析与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 48-50.  
CHAI Yi, ZHANG Ke, MAO Yongfang, et al. Analysis and technology of dynamic system operation safety[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019: 48-50. (in Chinese)
- [22] 李靖, 杨帆. 分布式协同多机器人多任务目标遍历路径规划[J]. 天津工业大学学报, 2020, 12(6): 70-74.  
LI Jing, YANG Fan. Distributed collaborative multi-robot multi-task target traversal path planning[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2020, 12(6): 70-74. (in Chinese)
- [23] 丁勇. 独立同均匀分布随机变量和的性质[J]. 统计与决策, 2021, 37(17): 71-73.  
DING Yong. Properties of sum of independent and uniformly distributed random variables[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(17): 71-73. (in Chinese)
- [24] 张斯龙, 何世熠, 陈亮, 等. 基于概率密度函数的加权变换在能谱测量中的应用[J]. 现代应用物理, 2022, 13(1): 45-51.  
ZHANG Silong, HE Shiyi, CHEN Liang, et al. Applica-

- tion of weighting transformation based on probability density function in energy spectrum measurement[J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13(1): 45-51. (in Chinese)
- [25] 崔铁军, 李莎莎. 系统故障演化过程最终事件状态及发生概率研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(8): 2-6.  
CUI Tiejun, LI Shasha. Research on the final event state and occurrence probability of system failure evolution process [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(8): 2-6. (in Chinese)
- [26] 陈敏捷, 羊荣金. 液压支架液压系统故障仿真与诊断技术研究[J]. *液压与气动*, 2021(8): 128-131.  
CHEN Minjie, YANG Rongjin. Research on fault simulation and diagnosis technology of hydraulic system of hydraulic support[J]. *Hydraulic and pneumatic*, 2021(8): 128-131. (in Chinese)
- [27] 张颖, 董国强. 基于DEMATEL与逻辑树的海底原油管道泄漏风险分析[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(10): 1692-1693.  
ZHANG Ying, DONG Guoqiang. Leakage risk analysis of submarine crude oil pipeline based on DEMATEL and logic tree[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(10): 1692-1693. (in Chinese)
- [28] 中国民用航空局. 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则: CCAR-121.329-331[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.  
Civil Aviation Administration of China. Operation qualification certification rules for large aircraft public air transport carriers: CCAR-121.329-331[S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)
- [29] 中国民用航空局. 航空器的运行文件: AC-91-24.6[S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.  
Civil Aviation Administration of China. Operating documents of aircraft: AC-91-24.6[S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)
- 作者简介:**  
孙晨赫(1985-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机适航安全及健康监控。  
曹湘玲(1990-),女,硕士,讲师。主要研究方向:航空运输,航空器管理。
- (编辑:马文静)

=====  
(上接第 118 页)

- [27] 王轩. 飞机前轮摆振稳定性分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
WANG Xuan. Research on aircraft nose wheel shimmy stability analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [28] 陈大伟. 起落架摆振的非线性分析及控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
CHEN Dawei. Nonlinear analysis and control of landing gear shimmy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [29] 尤里阿库兹涅佐夫. 应用分支理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 68-78.  
ULIAKUZNETSOV. Fundamentals of applied branch theory[M]. Beijing: Science Press, 2010: 68-78. (in Chinese)
- 作者简介:**  
洪煜清(1998-),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器起降系统。  
聂宏(1960-),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器起落装置设计。  
张明(1981-),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器起落装置设计。  
阮爽(1998-),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器动力学分析。
- (编辑:马文静)