

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.013

## 一种基于故障统计数据的发动机风险预测

李龙彪 毕苏艺 孙有朝

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**给出了发动机故障危险等级划分、危险系数确定、风险因子与飞行风险的计算方法,建立了基于蒙特卡罗仿真的发动机多故障模式风险评估流程,预测发动机故障发生情况,评估发动机使用阶段的故障风险。在已有航空发动机历史故障数据的基础上,对多种故障模式进行了风险预测,制定了两种可降低风险的方案,分析了维修周期对风险因子的影响,给出了合理的降低风险方案。

**关键词:**航空发动机;多故障模式;蒙特卡洛仿真;风险评估

**中图分类号:**V239      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2015)04-0559-07

## Risk Prediction of Aero-Engine Based on Failure Statistic Data

Li Longbiao, Bi Suyi, Sun Youchao

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The classification of failure risk level, the determination of hazard ratio, and the calculation of the risk factor and risk per flight are proposed. The risk assessment process for aero-engine multi-failure mode is presented based on the Monte Carlo simulation to predict the occurrence of the failure and assess the failure risk. According to the history aero-engine failure data, the risk of multi-failure is predicted. Two corrective actions are presented to reduce risk occurrence probability. The most reasonable action is established according to the analysis of the influence of different maintenance interval on risk factor.

**Key words:** aero-engine; multi-failure mode; Monte Carlo simulation; risk assessment

随着全球航空运输需求的增加,飞行安全逐渐受到重视<sup>[1-2]</sup>。航空发动机作为飞机的动力装置,为飞机提供飞行动力,是飞行安全最为关键的部件。随着航空发动机性能不断的提高,结构愈加复杂,发动机部件在运营阶段发生故障的概率逐渐增加<sup>[3]</sup>。因此,发动机风险评估方法的研究受到越来越多的关注。

美国西南研究院联合 Rolls-Royce, General Electric 和 Pratt & Whitney 共同研发了发动机部件区域风险评估方法<sup>[4-7]</sup>,为发动机制造商提供了

一种概率风险预测与管理工具。美国联邦航空局颁布了咨询通告 AC39-8<sup>[8]</sup>,提供了基于威布尔分析和蒙特卡洛仿真的运输类飞机动力装置和辅助动力装置的持续适航风险评估方法。虞兰<sup>[9]</sup>采用蒙特卡洛仿真建立了航空发动机故障风险仿真模型,分析了预防维修方式和维修周期对故障风险的影响。王冠茹等<sup>[10]</sup>建立了民用飞机持续适航阶段事件风险评估流程,采用概率统计与安全性分析方法评估事件导致因素严重性以及发生可能性,分析事件对单机与机队的影响。李书明等<sup>[11]</sup>在发动机

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金(U1333119,60572171,60979019,60939003)资助项目;国防基础科研计划资助项目;中国民用航空局科技项目(MHRD0722,MHRD200908)资助项目。

收稿日期:2015-04-18;修订日期:2015-05-23

通信作者:李龙彪,男,讲师,E-mail:llb451@nuaa.edu.cn。

涡轮叶片寿命层面上提出了三参数的威布尔分布,采用极大似然估计方法确定了其寿命的实际分布,为发动机涡轮叶片的可靠性定量评估提供了一种切实可行的方法。目前,国际上关于航空发动机概率风险评估的研究无论在评估体系还是在基础数据获得方面都取得了很好的进展<sup>[12]</sup>,发展了较为成熟的计算代码<sup>[13-14]</sup>。而国内,系统开展该领域的文献极少,极大地制约了中国国内大型商用航空发动机的研发与适航取证。

本文采用蒙特卡罗仿真方法模拟发动机多故障发生情况,结合发动机故障危险等级以及危险系数的确定方法,计算各故障模式的风险因子以及每次飞行风险,评估发动机使用阶段的故障风险水平。以某型航空发动机为例,分别对涡轮盘裂纹、叶片打伤、滑油泵故障、压气机叶片裂纹、油管裂纹和燃烧室裂纹 6 种故障模式进行风险预测,制定不同的可降低风险的方案,并进行蒙特卡罗仿真与风险评估,分析不同维修方式与维修周期对风险因子的影响,制定出最合理的降低风险的方案。

## 1 发动机故障风险

### 1.1 发动机故障危险等级划分

通过故障事件对飞机、乘客与机组人员带来后果的严重程度定义危险等级,危险等级最高为五级,即灾难性后果,该等级的事件将导致伤亡,通常伴随着飞机损毁;而四级事件将导致如迫降、飞机机身受损、严重或致命的人员伤害等重大的后果;三级事件将导致如飞机或次级不相关系统的实质性损坏等严重后果。由于一、二级事件的严重程度较低,本文风险评估方法只针对危险等级在三级或三级以上的事件。

### 1.2 发动机故障危险系数

咨询通告 AC39-8<sup>[8]</sup>对危险系数进行了定义,危险系数指特定的动力装置故障模式导致特定危险等级事件发生的概率或可能性,利用危险系数可以将初始风险因子转换为危险等级为三级、四级和五级事件的风险因子。

通过分析历史数据可以得到危险系数,假设某故障已经导致至少一次三级危险事件,则危险系数为三级(及以上)事件的发生次数除以危险事件总次数。然而,由于三级(及以上)危险事件发生的可能性很低,所以难以确定三级(及以上)危险事件的危险系数。若机队有 5 个燃烧室裂纹故障,且这些故

障确定为二级事件,此时三级事件数量为 0,则危险系数为  $0/5=0$ 。而危险系数为 0 是没有意义的,此时应假设下一个故障为三级(及以上)事件,以获得相对保守的危险系数。假设下一个燃烧室裂纹故障将是三级事件,保守计算危险系数为  $1/(5+1)=1/6$ 。

### 1.3 发动机故障事件风险准则与区域

风险因子指在给定时间内预期发生发动机故障风险事件的平均数,即:风险因子=预期故障数×危险系数。将风险因子与风险准则进行比较以判断事件的安全性,同时应把风险因子转换成每次飞行风险,以便在相同基础上比较风险。每次飞行风险指任意一架飞机在每次飞行中发生发动机故障事件的风险,设发动机总飞行小时为  $N_c$ ,则机队在飞行小时为  $N_c$  期间内的飞行风险为  $1/N_c$ ;设飞行风险为  $R$ ,风险因子为  $F$ 。则

$$R = \frac{F}{N_c} \quad (1)$$

风险因子和每次飞行风险有相应的长期和短期准则,三级和四级事件的风险准则如表 1 所示,当计算的机队每次飞行风险高出表 1 中规定风险水平时,需要采取措施来控制该风险。表 1 中的长期可接受风险准则应与未采取方案的风险比较,若未采取方案的风险超过了三级和四级长期可接受准则,则为不安全事件。而短期可接受准则包括了三级和四级事件的风险因子和每次飞行风险水平,其应与采取方案后的风险比较,使得最终采取方案后的风险满足短期可接受准则。

表 1 三级和四级事件风险准则

Tab. 1 Risk criterion of level 3 and level 4 events

可接受风险	三级准则		四级准则	
	风险因子	每次飞行	风险因子	每次飞行
长期	—	$1 \times 10^{-8}$	—	$1 \times 10^{-9}$
短期	1.0	$4 \times 10^{-5}$	0.1	$4 \times 10^{-6}$

图 1 以三级风险准则为例,将飞行风险划分为 3 个区域,得到每次飞行风险与飞行循环数的曲线。从图中可以看出,当风险因子大于 1.0 和每次飞行风险高于  $4 \times 10^{-5}$  时,属于高风险区域,必须采取强制措施,使风险降低到可接受水平。当风险因子小于 1,且每次飞行风险介于  $4 \times 10^{-5}$  和  $1 \times 10^{-8}$  时,属于多风险区域,需要采取制造商提供的可降低风险的方案。当三级事件每次飞行风险小于  $1 \times 10^{-8}$  时,与长期可接受风险准则一致,风险发生的可能小,属于可接受风险区域,不需要采取任何可降低风险方案。

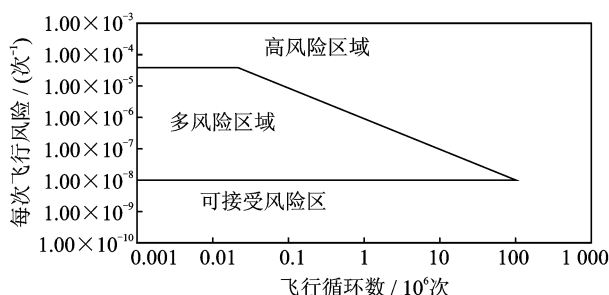


图1 三级事件风险区域划分

Fig. 1 Classification of level 3 risk zone

## 2 风险评估流程

基于危险等级、风险因子和风险准则等预测发动机故障风险,给出风险评估流程如图2所示,主要步骤包括:

(1)判断发动机故障事件的危险等级。

(2)计算未采取改进/改正措施前部件故障的风险因子。建立蒙特卡洛仿真模型,模拟发动机故

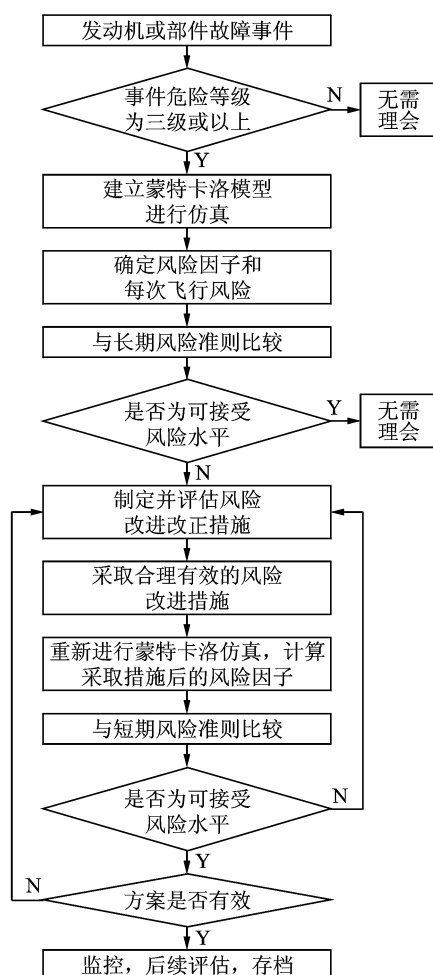


图2 基于蒙特卡洛仿真的风险评估流程

Fig. 2 Flowchart of risk assessment process using Monte Carlo simulation

障事件的发生情况,预测发动机在未来某段时间内的故障风险,计算不同危险等级事件发动机或其部件的危险系数,得到不同危险等级的风险因子,最后将得到的未采取改进/改正措施的风险因子与表1的长期风险准则进行比较。若低于可接受水平,不需要采取改进/改正措施;若高于可接受水平,需要开展风险分析与评估。

(3)制定适当的改进/改正措施。制定的改进/改正措施应具有可实施性,能有效降低故障的风险,并充分考虑其降低风险的有效性,执行该措施所需资源的可用性以及措施的可行性及便利性。估计可能降低的风险对所有备选措施进行评估,计算备选措施的风险因子,以便对不同措施进行比较。备选措施包括:定期维修或更换、按固定间隔或按役龄维修、改变维修周期及重新设计或改装等。另外,分析备选措施所需资源,例如时间、材料(部件及检查设备)和劳力等,在成本和风险之间进行合理权衡。按照成本收益将不同可供选择的措施排列优先级,若备选措施可能降低的风险相同,则按照成本排列优先级。

(4)实施合理的改进/改正措施。根据故障事件具体情况和风险分析结果决定是否采取改正措施以及采取何种措施。

(5)计算采取了风险改进措施的发动机或其部件的风险因子。重新进行蒙特卡洛仿真,将采取措施后得到的故障数换算成风险因子和每次飞行风险,将其与风险准则中的短期可接受水平进行比较,验证初始措施是否有效。初期改进措施,往往并不是处理故障事件的最终措施。因此,在措施实施阶段所收集的数据应认真审核,以提高分析过程和评估风险的有效性。

(6)监控改进/改正措施实施情况。应跟踪改进/改正措施的实施情况。通常初期措施并不是对故障事件的完整措施,在采取后续措施前验证任何初期措施未必可行。检查结果应继续监控,以确保任何临时措施持续验证假设和预测。所有措施都假设,任何能导致故障事件的因素都被消除或减轻。

(7)后续评估和对策。在许多情况下,故障事件所采取的初始措施并不足以有效降低风险至可接受水平,可能需要后续的对策和措施。在初始或后续措施中,都可采用上述评估过程。后续措施可能更能完整地理解故障事件的问题和影响因素。初期措施基于有限或部分数据,而后续措施通常基于更完整的信息。

发动机故障风险的预测需要结合故障危险等级、风险因子和风险准则等,主要步骤包括:

(1) 确定发动机故障事件的危险等级。

(2) 建立蒙特卡洛仿真模型,模拟发动机故障事件的发生情况。

(3) 计算发动机或其部件故障的危险系数  $C$ , 根据事件危险等级得到不同危险等级的风险因子  $F_i$ 。设发动机在模拟期间总的故障发生次数为  $N_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ), 则

$$F_i = N_i \times C \quad (2)$$

(4) 根据步骤(3)所得风险因子计算每次飞行风险,与风险准则进行比较,确定需要采取措施降低风险的故障。

(5) 针对步骤(4)中得到的故障,制定降低风险的措施,再次运用蒙特卡洛仿真模型,计算发动机或其部件故障的风险因子以及每次飞行风险。

(6) 比较不同措施对于发动机或其部件故障风险的影响,制定出最合理的改进措施。

### 3 蒙特卡罗仿真

统计表明,双参数威布尔分布对发动机故障模式分布具有很好的拟合性。双参数威布尔累积概率分布函数如下

$$F(t) = 1 - e^{-c^{1/\eta} t}^\beta \quad (3)$$

式中: $\beta$  和  $\eta$  为形状参数和尺度参数。对式(3)变换,可以得到故障时间  $t$  为

$$t = \eta [-\ln(1 - F(t))]^{1/\beta} \quad (4)$$

设发动机有  $n$  种故障模式,分别记为  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , 这  $n$  种故障模式相互独立,均服从威布尔分布,其分布参数分别记为  $(\eta_1, \beta_1), \dots, (\eta_n, \beta_n)$ , 由式(3)得到故障时间  $t_k$  为

$$t_k = \eta_k [-\ln(1 - F_k(t))]^{1/\beta_k} \quad (5)$$

假定发动机定期检查时间为  $T$ ,当故障修复后,发动机使用时间重新累计,累积到时间  $T$  时,再做下次定检。假设机队有 6 种不同的故障模式,建立蒙特卡罗模拟运行流程如图 3 所示,其基本流程如下:

(1) 输入机队的原始数据,包括机队总数  $m$ , 使用率  $t_m$ , 机队年龄分布。

(2) 生成  $[0, 1]$  区间的随机数  $F_k(t)$ 。

(3) 针对每台发动机,利用随机数和式(4)计算各故障模式的随机故障时间  $t_1, t_2, \dots, t_6$ , 首次故障时间需大于发动机的已安全运行时间,否则需重新产生一组随机故障时间,直到均大于发动机已安全运行时间。

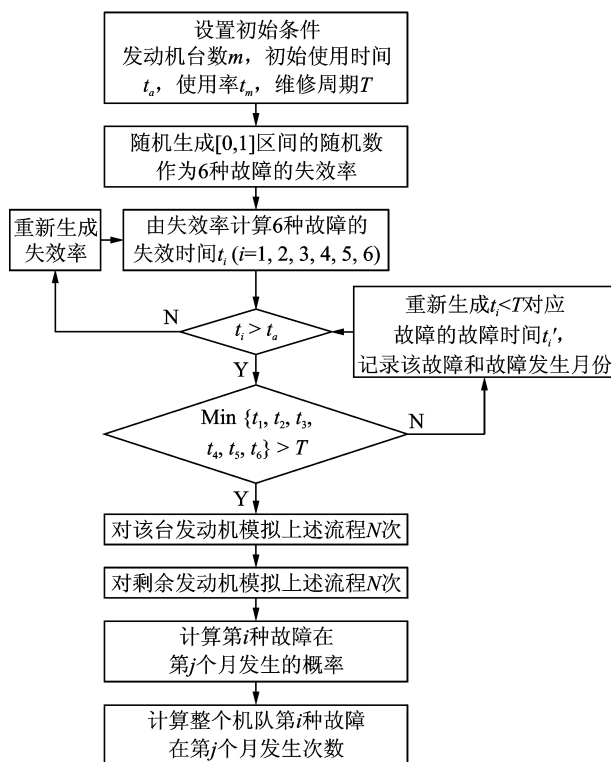


图 3 蒙特卡洛模型模拟 6 种独立故障流程图

Fig. 3 Flowchart of six independent failure modes using Monte Carlo simulation

(4) 判断  $\min\{t_1, t_2, \dots, t_6\}$  是否小于定期检查时间  $T$ , 若是, 则记录该故障以及故障发生月份, 月份计算公式为

$$\text{month} = \left[ \frac{t_i - t_a}{t_m} \right] + 1 \quad (6)$$

式中,  $[\cdot]$  表示取整。

(5) 针对步骤(4)发生的故障模式, 重新生成该故障的故障时间。

(6) 重复步骤(4, 5), 直到  $\min\{t_1, t_2, \dots, t_6\}$  超过发动机定期检查时间  $T$ , 则一次模拟结束。

(7) 对剩余  $m-1$  台发动机进行上述模拟, 每台发动机均进行  $N$  次模拟, 并记录结果, 发动机故障发生概率近似为

$$P_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N \cdot m + N'} \quad (7)$$

式中:  $i$  为故障发生模式;  $j$  为故障发生月份;  $N_{i,j}$  为第  $i$  种故障在第  $j$  个月发生次数;  $N$  为模拟次数,  $m$  为发动机数量;  $N'$  为额外模拟次数。

(8) 计算发动机各故障模式发生的概率。

(9) 计算机队未来一段时间内发动机各故障发生次数。由式(7)得到机队发动机故障发生次数  $F_{i,j}$  为

$$F_{i,j} = m \cdot P_{i,j} \quad (8)$$

4 案例分析

4.1 不考虑纠正措施

对某型号 1 779 台航空发动机的数据进行统计,该发动机使用率 $t_m$ 为 25 h/月,维修间隔 $T_p$ 为 1 000 h。通过威布尔分析获得该型号发动机 6 种相互独立的故障模式的分布参数,分别为涡轮盘裂纹、叶片打伤、滑油泵故障、压气机叶片裂纹、油管裂纹及燃烧室裂纹(见表 2),其中涡轮盘裂纹、压气机叶片裂纹与油管裂纹参数均来自文献[9],其他故障模式参数来自某发动机公司手册。

表 2 6 种故障模式的分布参数  
Tab. 2 Parameters of six failure modes

故障模式	$\beta$	$\eta/h$
涡轮盘裂纹	2.09	10 193
叶片打伤	1.97	10 250
滑油泵故障	4.54	3 472
压气机叶片裂纹	4.57	2 336
油管裂纹	1.89	12 050
燃烧室裂纹	2.03	10 100

针对机队发动机初始使用时间为 0 的情况,利用本文建立的仿真模型预测故障在未来 40 个月内的发生情况。发动机 6 种故障在未来 12 个月内的故障发生情况如表 3 所示。以第 20 个月为例,每模拟 10 000 次输出一 次结果,模拟 1 000 000 次输出 100 个结果,6 种故障发生次数随模拟次数变化情况如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着模拟次数的增加,故障在第 20 个月的发生次数也逐渐增加,最终趋于收敛。

表 3 6 种故障在 12 个月内故障发生情况  
Tab. 3 Occurrence of six failure modes in 12 months

月份	涡轮盘 裂纹/次数	叶片打伤/ 次数	滑油泵 故障/ 次数	压气机 叶片裂纹/ 次数	油管裂纹/ 次数	燃烧室 裂纹/ 次数
1	0.006 367	0.012 934	0.000 003	0.000 002	0.015 379	0.009 221
2	0.020 681	0.037 764	0.000 008	0.000 041	0.041 729	0.028 682
3	0.036 070	0.062 076	0.000 039	0.000 233	0.065 745	0.048 467
4	0.051 956	0.085 870	0.000 134	0.000 744	0.088 873	0.068 570
5	0.068 505	0.109 677	0.000 321	0.001 816	0.111 087	0.088 776
6	0.084 964	0.133 224	0.000 650	0.003 679	0.132 769	0.109 177
7	0.102 100	0.156 781	0.001 171	0.006 705	0.154 278	0.129 705
8	0.119 485	0.180 194	0.001 928	0.011 107	0.175 009	0.150 270
9	0.136 837	0.203 196	0.002 989	0.017 354	0.195 598	0.170 954
10	0.154 547	0.226 431	0.004 456	0.025 766	0.215 954	0.191 265
11	0.172 233	0.249 609	0.006 327	0.036 773	0.235 939	0.212 38
12	0.190 044	0.272 474	0.008 778	0.050 846	0.256 185	0.233 239

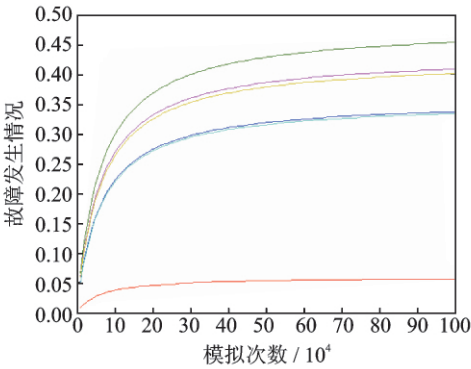


图 4 6 种故障发生次数随模拟次数变化情况  
Fig. 4 Occurrence times of six failure modes versus simulation times

根据美国联邦航空管理局(Federal aviation administration,FAA)总结的发动机非包容故障事件历史数据<sup>[15]</sup>,可以分别得到 6 种故障模式的危险系数。在 21 个涡轮盘裂纹故障中,有 3 个三级故障事件,则由 1.2 节可知涡轮盘裂纹故障三级事件危险系数为  $C^1=3/21\approx0.14$ ;在 30 个叶片打伤故障中,有 4 个三级故障事件,则叶片打伤故障三级事件危险系数为  $C^2=4/30\approx0.13$ ;在 30 个滑油泵故障中,有 3 个三级故障事件,则滑油泵三级故障事件危险系数为  $C^3=3/30=0.1$ ;在 70 个压气机叶片裂纹故障事件中,一般为一、二级事件,假设下一事件为三级事件,即在 71 个压气机叶片故障事件中有一个三级事件故障,故对其危险系数进行保守计算为  $C^4=1/(70+1)\approx0.014$ ;在 500 个油管裂纹故障事件中,均为二级事件,假设下一事件为三级事件,可得油管三级事件危险系数为  $C^5=1/(500+1)\approx0.002$ ;在 50 个燃烧室裂纹故障中,有 4 个三级故障事件,则燃烧室裂纹三级事件危险系数为  $C^6=4/50=0.08$ ;设发动机总飞行小时为  $10^9$  h,结合 6 种故障在 40 个月内累计故障次数和式(2)计算,得到 6 种故障模式的风险因子,由式(1)可知 6 种故障的每次飞行风险。6 种故障的风险因子和每次飞行风险计算结果如表 4 所示。

改变维修周期为 800,1 200 h,重新对 6 种故障进行模拟,模拟结果如表 5 所示,计算 6 种故障对应风险因子和飞行风险,结果如表 6 所示。

对比表 4,1 风险准则可以发现,涡轮盘裂纹,叶片打伤和燃烧室裂纹故障飞行风险已经超过短期可接受风险,应当采取措施降低风险;对比表 4,6 可以发现,维修时间间隔越短,故障发生风险也越小。

表 4 6 种故障风险因子和每次飞行风险

Tab. 4 Risk factor and risk per flight of six failure modes

故障模式	风险因子	每次飞行风险
涡轮盘裂纹	2.28	$2.28 \times 10^{-9}$
叶片打伤	2.31	$2.31 \times 10^{-9}$
滑油泵故障	0.68	$0.68 \times 10^{-9}$
压气机叶片裂纹	0.53	$0.53 \times 10^{-9}$
油管裂纹	0.03	$0.03 \times 10^{-9}$
燃烧室裂纹	1.18	$1.18 \times 10^{-9}$

表 5 6 种故障平均发生次数

Tab. 5 Average occurrence times of six failure modes

故障模式	平均发生 次数/800 h	平均发生 次数/1 200 h
涡轮盘裂纹	12.482	18.736
叶片打伤	15.663	20.711
滑油泵故障	4.992	8.820
压气机叶片裂纹	32.458	43.244
油管裂纹	10.920	17.798
燃烧室裂纹	11.919	19.560

表 6 不同飞行周期下 6 种故障风险因子和每次飞行风险

Tab. 6 Risk factor and risk per flight of six failure modes under 800 h and 1 200 h

故障模式	风险 因子/ 800 h	每次 飞行风险/ 800 h	风险 因子/ 1 200 h	每次 飞行风险/ 1 200 h
涡轮盘裂纹	1.740	$1.74 \times 10^{-9}$	2.623	$2.623 \times 10^{-9}$
叶片打伤	2.030	$2.03 \times 10^{-9}$	2.692	$2.692 \times 10^{-9}$
滑油泵故障	0.499	$0.499 \times 10^{-9}$	0.882	$0.882 \times 10^{-9}$
压气机叶片裂纹	0.454	$0.454 \times 10^{-9}$	0.605	$0.605 \times 10^{-9}$
油管裂纹	0.021	$0.021 \times 10^{-9}$	0.036	$0.036 \times 10^{-9}$
燃烧室裂纹	0.954	$0.954 \times 10^{-9}$	1.565	$1.565 \times 10^{-9}$

#### 4.2 考虑纠正措施

由 4.1 节可知,涡轮盘裂纹,叶片打伤和燃烧室裂纹故障飞行风险已经超过风险准则的可接受水平,需要制定合理的改正/改进措施来减小风险因子。以燃烧室裂纹为例,制定两种可选的可减小风险的改正/改进措施。

(1) 改变维修周期。在初始模拟期间,采用的维修周期  $T=1\ 000\text{ h}$ ,在不改变除了维修周期的其他发动机参数,如发动机数量、初始使用时间、使用率等的情况下,更改发动机的维修周期,将其更改为  $T=800\text{ h}$ 。

(2) 保持其他参数不变,重新设计燃烧室,选择高强度材料,使其寿命增加 20%,即  $\eta=12\ 120$ 。

根据上述两种措施的参数分别重新代入蒙特卡洛仿真模型中进行风险评估,两种措施及模拟结

果见表 7。结合表 7 与风险准则可以看出,两种措施均能有效减小三级风险因子。由表 7 可见,0.954 和 0.912 均小于风险准则三级事件短期可接受风险 1,每次飞行风险  $0.954 \times 10^{-9}$  和  $0.912 \times 10^{-9}$  均小于三级事件短期可接受每次飞行风险  $4 \times 10^{-5}$ ,确保了航空发动机安全性。但是措施(2)需要对整个机队燃烧室进行重新设计并更换,相比于措施(1)而言,综合经济成本较高,且措施(1)易于执行。因此,应选择措施(1)降低风险,并对措施(1)实施后续监控。

表 7 不同改进措施的模拟结果

Tab. 7 Simulation results of different corrective actions

参数	改进内容	燃烧室 裂纹 故障数	燃烧室 裂纹 三级风 险因子	燃烧室 裂纹 每次飞 行风险
初始	未采取措施	14.752	1.180	$1.18 \times 10^{-9}$
措施 (1)	改变维修周期 $T=800\text{ h}$	11.919	0.954	$0.954 \times 10^{-9}$
措施 (2)	重新设计燃烧室, 不改变维修周期, 选择高强度材料, 使其寿命增加 20%, 即 $\eta=12\ 120\text{ h}$	11.399	0.912	$0.912 \times 10^{-9}$

## 5 结 论

本文提出了基于蒙特卡洛仿真的航空发动机故障风险评估方法,建立了模拟发动机部件故障的蒙特卡洛仿真模型,预测发动机使用阶段的故障发生情况,给出了发动机故障危险等级划分、危险系数和风险因子的计算方法,分析了航空发动机运营阶段的风险水平。针对航空发动机使用阶段涡轮盘裂纹、叶片打伤、滑油泵故障、压气机叶片裂纹、油管裂纹及燃烧室裂纹 6 种故障模式,模拟了故障在 40 个月内的发生情况。针对燃烧室裂纹故障,提出了两种降低风险的方案,得出结论:

(1) 未采取措施时燃烧室裂纹每次飞行风险为  $1.18 \times 10^{-9}$ ,需要采取措施降低风险;

(2) 改变维修周期后燃烧室裂纹每次飞行风险为  $0.954 \times 10^{-9}$ ,处于安全水平;

(3) 重新设计燃烧室后,每次飞行风险为  $0.912 \times 10^{-9}$ ,相对措施(1)能够更有效降低飞行风险,在技术条件能达到的情况下,措施(2)可以减少维修次数。

## 参考文献:

- [1] 王世锦. 繁忙终端空域飞行冲突风险[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 538-543.  
Wang Shijin. Flight conflict risk in busy terminal airspace [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(4): 538-543.
- [2] 田文, 胡明华. 空域拥挤风险管理时间决策模型与方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(4): 566-571.  
Tian Wen, Hu Minghua. Time decision making model and methodology for airspace congestion risk management [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(4): 566-571.
- [3] 赵运生, 胡骏, 屠宝锋, 等. 部件老化对大涵道比涡扇发动机性能影响仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 447-452.  
Zhao Yunsheng, Hu Jun, Tu Baofeng, et al. Simulation of component deterioration effect on performance of high bypass ratio turbofan engine [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(4): 447-452.
- [4] Millwater H R, Enright M P, Fitch S H K. A convergent probabilistic technique for risk assessment of gas turbine disks subject to metallurgical defects [R]. AIAA-2002-1382, 2002.
- [5] Millwater H R, Larsen J, John R. Effects of residual stresses on probabilistic lifing of engine disk materials [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 468/469/470: 129-136.
- [6] Huyse L, Enright M P. Efficient statistical analysis of failure risk in engine rotor disks using importance sampling techniques [R]. AIAA-2003-1838, 2003.
- [7] Huyse L, Enright M P. Efficient conditional failure analysis application to an aircraft engine component [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2006, 2(3/4): 221-230.
- [8] U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Advisory circular 39-8: Continued airworthiness assessments of power plant and auxiliary power unit installations of transport category airplanes [S]. FAA AC 39-8, 2003.
- [9] 虞兰. 航空发动机故障风险仿真评估方法[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 1997, 3(1): 108-112.  
Yu Lan. Risk assessment approach of aero-engine failures [J]. Journal of Shanghai University: Science, 1997, 3(1): 108-112.
- [10] 王冠茹, 孙有朝, 李龙彪, 等. 民机持续适航事件风险评估流程研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012, 106(3): 29-32.  
Wang Guanru, Sun Youchao, Li Longbiao, et al. Occurrence risk analysis process and methods during continuing airworthiness of civil aircraft [J]. Civil Aircrafts Design and Research, 2012, 106(3): 29-32.
- [11] 李书明, 董成利, 黄晓燕. 基于威布尔的发动机涡轮叶片寿命可靠性评估[J]. 中国民航大学学报, 2008, 26(4): 14-17.  
Li Shuming, Dong Chengli, Huang Xiaoyan. Evaluate reliability of aero-engine turbine blades based on weibull-distributing [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2008, 26(4): 14-17.
- [12] Kappas J. Review of risk and reliability methods for aircraft gas turbine engines [R]. DSTO-TR-1306, 2002.
- [13] Millwater H R, Enright M P, Fitch S H K. A convergent probabilistic technique for risk assessment of gas turbine disks subject to metallurgical defects [R]. AIAA-2002-1382, 2002.
- [14] Wu Y T, Enright M P, Millwater H R. Probabilistic methods for design assessment of reliability with inspection [J]. AIAA Journal, 2002, 40(5): 937-946.
- [15] Aerospace Industries Association. Propulsion system and APU-related aircraft safety hazards [R]. AIA PC-342, 1999.