

民用飞机维修间隔风险评估方法研究

余 芬, 李 哲, 张 军, 张伟刚

(中国民航大学航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 鉴于维修间隔对飞行安全的重要性, 针对民机维修间隔的风险评估问题, 结合部件故障预测与机队风险评估模型, 提出了基于蒙特卡罗仿真的民机维修间隔风险评估方法。通过实例对飞机总温探头的故障时间进行仿真, 预测了机队飞行事故的发生次数, 得出几种不同维修间隔方案的风险因子和飞行事故率。结果表明维修间隔风险水平与实际情况吻合, 证明提出的方法能有效地对维修间隔的风险进行定量评估, 具有一定的实用性。

关键词: 维修间隔; 风险评估; 飞行事故; 故障预测; 蒙特卡罗仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** B

Research on Risk Assessment Methods of Civil Aircraft Maintenance Interval

YU Fen, LI Zhe, ZHANG Jun, ZHANG Wei-gang

(School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: Considering the importance of the maintenance interval for flight safety and aiming at the risk assessment for civil aircraft maintenance interval, combined with the component failure risk prediction and risk assessment model of aircraft fleet, the paper put forward an evaluation method of civil aircraft maintenance interval risk based on Monte Carlo simulation. Through the simulation for fault time of aircraft temperature probe, we predicted the flight accident occurrence of the aircraft fleet, obtained flight accident rate and risk factors of several different maintenance interval. Results show that the risk level of the maintenance interval coincides with the actual situation and the proposed approach can effectively evaluate the risk of the maintenance interval, which has a certain practicality.

KEYWORDS: Maintenance interval; Risk assessment; Flight accident; Fault prediction; Monte-Carlo simulation

1 引言

保证飞行安全是航空运输永恒的主题, 随着现代飞机设计制造的进步, 其飞行事故发生概率很小, 民用飞机相对于其他交通工具是最安全的, 但是当飞行事故发生时, 不仅给航空公司造成巨大的损失, 而且会对社会大众造成很大的冲击和震撼。

造成飞行事故的原因很多, 其中部附件的维修间隔是一个影响飞行安全不可忽略的因素。航空公司不合理地调整了维修保养和更换零件的时间, 是造成阿拉斯加航空 261 号航班空难的原因之一^[1]。在实际运营过程中为了降低飞机的维护成本, 航空公司往往对维修间隔进行优化、调整, 有关民机维修间隔优化的领域很多学者做了大量的研究, 一些优化模型在实际应用中起到很好的指导作用。然而不同航空公司其管理运营水平不同, 将导致优化模型中维修成本项、维修能力的差异, 这势必影响到维修间隔优化结果; 目前我

国航空公司其可靠性管理水平还有待提高, 在运营过程中所搜集的故障数据较为有限, 可用数据少, 若使用这些数据进行维修间隔的优化, 会带来较大的误差。上述问题的存在致使飞机维修间隔在调整后存在一定的风险, 为保证飞行安全, 很有必要对调整后的维修间隔进行风险评估。

维修间隔的风险是指在执行相应的维修间隔时, 由于维修间隔的不合理使得没有在恰当的时机对飞机系统或部件进行维修, 而使飞机系统或部件处于故障状态, 并且导致飞行事故的发生。目前针对民机维修间隔风险评估的研究不多, 但一些学者对故障风险进行了研究, Galileo Tamasi 等^[2]提出了一种基于威胁性、关键性和脆弱性概念的风险评估过程, 用于对民用航空安全进行风险评估。针对发动机故障风险评估, 赵洪利等^[3]在单故障模型的基础上, 给出了航空发动机多故障风险预测方法; 李龙彪等^[4]基于故障统计数据, 对航空发动机多故障模式进行了风险评估; 徐庆宏等^[5]对发动机运营阶段的故障风险进行评估, 通过分析不同的维修方式和维修间隔, 制定出合理的降低风险的方案。然而文献 [3-5] 侧重于对发动机故障的风险评估, 没有结合整个飞机机队进行风险评估。针对机队风险评估李龙彪等^[6]提出了机

基金项目: 国家自然科学基金(71402021); 中国民航大学科研启动基金(2015QD11S)

收稿日期: 2017-02-20 修回日期: 2017-03-04

队风险评估模型;王冠茹等^[7]对民机持续适航事件风险评估流程进行了研究;郭媛媛等^[8]结合故障分析对单机风险和机队风险评估进行了研究。文献[6-8]尽管给出了机队风险评估模型,但没有从维修间隔的角度对机队风险进行评估。

本文从民用飞机飞行事故等级出发,在已有部附件历史故障数据的基础上,将飞机部件的故障预测与机队风险评估相结合,提出了基于蒙特卡罗仿真的民机维修间隔风险评估方法,通过预测整个机队的故障次数,结合飞行事故危险系数、风险因子和机队飞行事故率的计算方法,从维修间隔的角度对整个飞机机队的飞行事故风险进行评估,为航空公司的维修间隔优化、调整,维修间隔风险评估提供参考。

2 民机飞行风险

2.1 飞行事故等级

民用航空器飞行事故,是指民用航空器在运行过程中发生的人员伤亡、航空器损坏的事件,飞行事故等级是根据飞行事故对飞机、乘客和机组人员带来的严重后果程度来定义的。根据我国相关法规,飞行事故等级可以划分为三个等级:特别重大飞行事故,重大飞行事故,一般飞行事故^[9]。随着现代飞机设计制造相对早期较为成熟,以及各种新技术和冗余系统的应用,飞行事故发生的概率相对很小,为更好地评估飞行安全,人们更多的关注飞行事故征候的发生率。飞行事故征候是指航空器飞行实施过程中发生的未构成飞行事故或航空地面事故但与航空器运行有关,影响或者可能影响飞行安全的事件。

2.2 部件故障危险系数

飞机部件故障后果具有不确定性,发生后会导致哪个等级的飞行事故、带来多大损失都存在偶然性。危险系数指部件或系统发生对应的故障,该故障直接导致某一等级的飞行事故发生的概率,危险系数通常由历史数据得到^[10]。例如飞机某部件共发生8次故障,其中由该故障直接导致3次飞行事故征候,则该故障飞行事故征候的危险系数 $C=3/8=0.375$ 。由于现有的历史数据显示,该故障的发生并没有导致更高等级别的飞行事故,然而这并不代表该故障的其它飞行事故的危险系数为0,为了保证飞行安全,假设该故障下一次将导致一般飞行事故,则该故障一般飞行事故的危险系数 $C=1/9=0.111$ 。

2.3 飞行事故风险因子

飞行事故风险因子是指在特定的时间范围内,预期发生飞行事故的平均次数,即飞行事故发生的频率值^[4]。

$$R=N\times C \tag{1}$$

式中, R 为机队飞行事故风险因子; N 为机队发生故障次数; C 为故障危险系数。

2.4 飞行事故衡量指标

目前,在对航空事故进行统计分析时,西方国家普遍采用每百万次离港事故率作为衡量指标,而我国民航则采用每百万小时事故率作为衡量指标;在衡量飞行事故征候时,通

常采用万时率。

机队飞行事故发生率 F

$$F=\frac{R}{\sum_{i=1}^n t_{mi}\times K_i} \tag{2}$$

式中, F 为机队飞行事故率; $\sum_{i=1}^n t_{mi}\times K_i$ 为机队暴露于风险的时间, n 为机队规模, t_{mi} 为机队中第 i 架飞机使用率(飞行小时/月), K_i 为机队中第 i 架飞机暴露于风险的月份。

通常飞行事故发生率越小越好,尽管人们一直在不断的探索以减少飞行事故,直到现在也只能在有限的空间和时间有限的降低其发生的可能性,或减少损失程度,却不能也不可能完全消除飞行事故。为此需要一个风险接受准则^[11],当飞行故事率高于表中的风险水平时,则需要采取措施来控制该风险。

表 1 飞行事故频率级别

频率 级别	几乎不可 能发生	发生可能 性极小	发生可 能性小	比较经 常发生	经常 发生
概率范围	$<10^{-9}$	$10^{-9}\sim10^{-7}$	$10^{-7}\sim10^{-5}$	$10^{-5}\sim10^{-3}$	$10^{-3}\sim1$

3 风险评估流程

维修间隔风险评估是通过模拟仿真飞机部附件故障的发生情况,从而得出机队飞行事故风险因子和飞行事故率,实现对维修间隔的风险评估。在民机运营使用阶段,当飞机部附件或系统发生故障、失效时可能会导致飞行事故的发生。通过对已发生的故障进行分析,结合飞行事故等级及事故发生的可能性,为此给出维修间隔风险评估过程:

1) 确定相关部附件故障模式和飞行事故等级,并根据历史数据计算故障不同危险等级事件危险系数。

2) 建立蒙特卡洛仿真模型,模拟飞机部附件故障的发生情况,预测飞机在未来某段时间内的飞行事故的次数,并计算不同飞行事故等级的风险因子。

3) 根据仿真结果计算飞行事故风险值和事故率,并与风险准则表1进行比较,如果风险在可以接受的范围内,则不对维修间隔进行调整,否则重新调整维修间隔,并再次进行风险分析与评估,直到风险处于可接受的范围内。

4) 将所得风险值、维修间隔和失效时间分布参数存档,用于后期评估。

4 蒙特卡罗仿真过程

在可靠性理论中,产品寿命分布函数记为 $F(t)$,它表示在规定条件下,产品寿命不超过 t 的概率,或者说产品在时刻 t 前发生失效的概率

$$F(t)=F(t;\theta) \tag{3}$$

式中, $F(t)$ 寿命分布函数; θ 为寿命分布函数参数集。

对(3)式进行变换得出故障时间 t 为

$$t = F[F(t); \theta]^{-1} \quad (4)$$

利用已有的飞机部附件故障数据,并得到其故障分布函数后,通过蒙特卡罗方法对机队飞机进行抽样,模拟故障的发生情况,从而预测与评估飞机在未来一段时间内的故障风险。

蒙特卡罗仿真流程如图 1 所示。

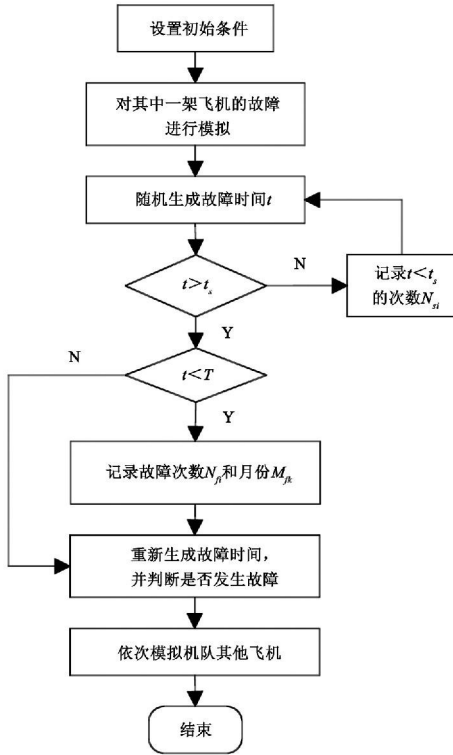


图 1 蒙特卡罗仿真流程

1) 设置仿真初始条件: 飞机机队规模 n , 机队中每架飞机部附件初始使用时间 t_{si} , 飞机使用率 t_{mi} 。该部附件的维修周期 T , 及其失效时间分布函数参数集 θ 。

2) 对该机队中的第 i 架飞机进行抽样仿真, 利用 *MATLAB* 内置的随机函数 *Rand* 生成 $F(t)$, $F(t)$ 服从 $(0, 1)$ 均匀分布, 将其代入 (4) 式生成该部附件的首次故障时间 t 。

3) 若第 i 架飞机的某部附件已经使用 t_{si} 时间, 若 $t_{si} > T$, 则令 $t'_{si} = t_{si}/T$ 的余数。将所得故障时间 t 与 t'_{si} 进行比较, 选出 $t > t'_{si}$ 的故障时间, 否则重新生成故障时间, 并记录 $t < t'_{si}$ 的次数 N_{si} 。

4) 将第 3) 步选出的故障时间 t 和维修间隔 T 进行比较, 若 $t \geq T$, 则表明该部附件在故障之前就已经对其维修, 不会发生该故障, 进行下一次模拟; 若 $t < T$, 则说明该部附件发生故障, 并记录其故障次数 N_{fi} , 故障发生月份 M_{fi} 。

$$M_{fk} = [(t_i - t_{si}) / t_{mi}] + 1 \quad (5)$$

式中, $[\cdot]$ 为取整; k 为第 k 个月。

5) 重新生成随机数以及对应的故障时间 t , 然后重复步骤 3) 和 4), 根据不同部件维修策略的不同设定相应的抽样

停止条件: 按役龄维修抽样停止条件为 $t > T$; 按役龄维修抽样停止条件为 $t + t_s > T$; 对于飞机结构, 其抽样停止条件为飞机翻修期。记录该架飞机每个月的故障次数 N_{fki} 和 N_{si} 。

6) 对机队其他飞机按照步骤 2) ~ 5) 进行 N 次模拟, 统计得到机队 m 架飞机每个月的故障次数 $N_{fk} = \sum_{i=1}^n N_{fki}$ 和 N_s

$$= \sum_{i=1}^n N_{si}。$$

计算该机队在第 k 个月, 故障发生频率:

$$P_{fk} = \frac{N_{fk}}{m \times N + N_s} \quad (6)$$

式中, P_{fk} 为第 k 个月故障发生频率; N 为仿真次数; N_s 为多余仿真的次数。

计算该机队在第 k 个月, 平均故障次数 \overline{N}_{fk}

$$\overline{N}_{fk} = m \times P_{fk} \quad (7)$$

整个机队预计总的故障次数 $N_f = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n N_{fki}$ (其中 $K = \max M_{fk}$), 则该机队在 K 个月内故障发生频率

$$P_f = \frac{N_f}{m \times N + N_s} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n N_{fki}}{m \times N + N_s} \quad (8)$$

计算该机队在 K 个月内, 平均故障次数 \overline{N}_f

$$\overline{N}_f = m \times P_f \quad (9)$$

该机队相应飞行事故的风险因子 R_j 为

$$R_j = \overline{N}_f \times C_j \quad (10)$$

式中, R_j 为对应第 j 类飞行事故风险因子; C_j 为对应造成第 j 类飞行事故的故障危险系数。

该机队的飞行事故发生率 F_j 为

$$F_j = \frac{R_j}{\sum_{i=1}^n t_{mi} \times K_i} = \frac{\overline{N}_f \times C_j}{\sum_{i=1}^n t_{mi} \times K_i} \quad (11)$$

式中, F_j 为机队对应第 j 类飞行事故发生率。

5 案例分析

某航空公司 B737NG 系列飞机总温探头的故障数据, 通过参数估计得出该型飞机总温探头故障时间符合威布尔分布, 参数为: $\eta = 14888$, $\alpha = 1.667$, 得出了不同修复时间的最优维修间隔为 330 飞行小时、368 飞行小时和 475 飞行小时^[12]。本文假设该航空公司机队规模为 150 架, 该机队每架飞机平均使用率为 200 飞行小时 / 月, 飞机总温探头经过维修后, 其可靠性达到出厂水平。为便于计算, 机队中各架飞机总温探头初始使用时间忽略不计。

利用 *MATLAB* 软件对该机队 150 架飞机按上述步骤进行仿真, 模拟故障在三个月内发生情况如表 2 所示。在仿真过程中, 为了降低模拟的偶然性, 得出稳定的结果, 以第 2 个月为例, 故障次数随模拟次数的变化情况如图 2 所示。

表 2 不同维修间隔对应的故障发生次数

月份	故障次数 / 次		
	330FH	368FH	475FH
1	0.113563	0.114061	0.114202
2	0.148026	0.200227	0.246696
3	0	0	0.119236
Σ	0.261625	0.314288	0.480134

从表 2 中可知,随着维修间隔的增大,整个机队飞机的故障也增多。

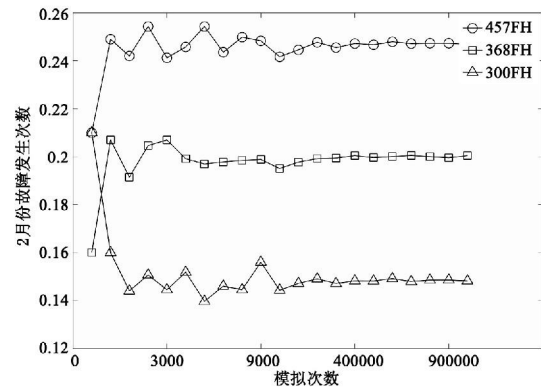


图 2 故障发生次数与随机模拟次数的变化情况

从图 2 中可以得出,随着模拟次数的增加,故障发生的次数增多,且随着模拟次数的不断增加最终趋于稳定。因此,为了使仿真结果更加逼近真实情况,设定模拟次数为 10^6 次。

设该型飞机总温探头出现过 46 次故障,其中该故障直接导致 34 次飞行事故征候,则其飞行事故征候危险系数为 $C_1 = 34/46 = 0.739$ 。由于该故障没有导致比飞行事故征候更为严重的飞行事故,假设下一次该故障将导致一次一般飞行事故,则其一般飞行事故危险系数为 $C_2 = 1/47 = 0.021$ 。

该机队暴露风险时间 $150 \times 200 \times 3 = 90000$ 飞行小时。将危险系数、机队暴露风险时间和表 2 中的故障次数代入式 (10) 和 (11) 得出该机队飞行事故风险因子和飞行事故发生率,如表 3、表 4 所示。

表 3 飞行事故征候风险因子和发生率

维修间隔	风险因子	事故征候发生率
330FH	0.1933	0.021478×10^{-4}
368FH	0.2323	0.025811×10^{-4}
475FH	0.3548	0.039422×10^{-4}

从表 3 中可以得出,事故征候率随维修间隔的增加而增大。三种维修间隔对应的事故征候万时率都较低,处于可接

受的范围。

表 4 一般飞行事故风险因子和发生率

维修间隔	风险因子	一般飞行事故发生率
330FH	0.005567	0.618511×10^{-7}
368FH	0.007325	0.813935×10^{-7}
475FH	0.010216	0.113509×10^{-6}

表 4 中该机队一般飞行事故率随维修间隔的增加而增大,对比表 1 可以得出:采用 330 飞行小时或 368 飞行小时作为维修间隔,其对应的一般飞行事故发生率分别为: 0.618511×10^{-7} 、 0.813935×10^{-7} ,该风险值在短期内是可以接受的,而采用 475 飞行小时作为飞机总温探头的维修间隔,其一般飞行事故率为 1.13509×10^{-7} ,其飞行事故率较大,存在较大的风险,为保证飞行安全应该避免采用该维修间隔。

6 结论

本文给出了飞行事故危险系数、风险因子和机队飞行事故率的计算方法,并分析了维修间隔风险评估流程,提出了维修间隔蒙特卡罗风险评估方法。实例通过对飞机总温探头的维修间隔风险的评估,得出对应维修间隔的风险因子和飞行事故率,结果表明:

1) 采用 330 飞行小时或 368 飞行小时作为该型飞机总温探头的维修间隔,引发飞行事故风险较低,具有较高的可靠性、安全性。

2) 维修间隔越大维修间隔的风险水平越高,该情况与实际维修实践相符,证明了本文提出的风险评估方法的正确性。

通过对民机维修间隔风险进行定量评估,在可接受风险范围内采用较大的维修间隔,保证飞行安全的同时有利于降低飞机的维护成本,从而能够为维修间隔优化、调整提供有效的参考,表明本文提出的方法具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] National Transportation Safety. Board Loss of Control and Impact with Pacific Ocean [R]. Alaska Airlines Flight 261, McDonnell Douglas MD-83, N963AS, About 2.7 Miles North of Anacapa Island, California, January 31, 2000.
- [2] Galileo Tamasi, Micaela Demichela. Risk assessment techniques for civil aviation security [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96: 892 - 899.
- [3] 赵洪利, 刘宇文. 基于蒙特卡罗模拟的航空发动机故障风险预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41 (3): 545-550.
- [4] 李龙彪, 毕苏艺, 孙有朝. 一种基于故障统计数据的发动机风险预测 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47 (4): 559-565.
- [5] 徐庆宏, 孙有朝, 李龙彪. 航空发动机部件故障风险评估方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (8): 1291-1296.

(下转第 158 页)



图3 文献[10]方法跟踪匹配效果



图4 本文方法跟踪匹配效果

2) 文中提出方法虽然在图像纹理特征变换过程中会引起边界点问题,但可以通过检测定位图像主要纹理特征区域而将冗余的边界点剔除,不影响实时跟踪匹配质量,也不损失匹配效率。

3) 利用文中提出的方法进行无线网络多媒体图像实时

跟踪匹配具有较为稳定的可靠性,匹配精度较高,具有一定的应用前景和实际意义。

参考文献:

- [1] 代少升,田永乐. 基于图像纹理特征的 SIFT 算法研究 [J]. 半导体光电, 2014, 35(1): 104-107.
- [2] 曹霞,等. 蕾丝花边的改进型纹理特征检索方法 [J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 142-147.
- [3] 宋子奇,等. 基于地形图像特征与模糊决策的海底地形可导航性分析方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(2): 164-169.
- [4] 白亚茜,刘著平,凌建国. 基于纹理特征的 SIFT 算法改进 [J]. 红外技术, 2016, 38(8): 705-708.
- [5] 闫自庚,等. 基于 SURF 特征和 Delaunay 三角网格的图像匹配 [J]. 自动化学报, 2014, 40(6): 1216-1222.
- [6] 倪健,等. 采用轮廓向量特征的嵌入式图像匹配方法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(13): 168-172.
- [7] 杨世沛,等. 一种基于 SIFT 的图像特征匹配方法 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 50-53.
- [8] 张志斌,等. 基于 SURF 算法的绿色作物特征提取与图像匹配方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 172-178.
- [9] 李丽,等. 基于特征点提取匹配的蝗虫切片图像的拼接和修复方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 157-165.
- [10] 李彦飞, LI Yan-fei. 关于弱纹理人脸图像匹配方法的改进研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(7): 331-334.

[作者简介]



王 宁(1987-),女(汉族),重庆人,硕士,讲师,主要研究领域为图像处理、物联网等;

闫会峰(1976-),男(汉族),河南许昌人,硕士,副教授,主要研究方向为数据挖掘、大数据计算等。

(上接第 69 页)

- [6] 李龙彪,等. 民机持续适航阶段机队风险评估方法研究 [J]. 飞机设计, 2015, 35(2): 62-66.
- [7] 王冠茹,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, (3): 29-32, 72.
- [8] 郭媛媛,等. 民用飞机运行风险评估方法 [J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 253-258.
- [9] GB 14648-1993,民用航空器飞行事故等级 [S]. 国家技术监督局, 1993.
- [10] U.S. Department of transportation, Federal Aviation Administration. Advisory circular 39-8: Continued airworthiness assessment of power plant and auxiliary power unit installations of transport category airplanes [S]. FAA AC 39-8, 2003.
- [11] 葛志浩,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+180.

- [12] 张鹏,许力,赵世伟. 飞机系统维修方式确定与维修间隔优化研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 68-71+76.

[作者简介]



余 芬(1963-),女(汉族),辽宁本溪人,硕士,教授,研究方向:飞机制造与维修技术;

李 哲(1987-),男(汉族),云南宣威人,在读研究生,研究方向:飞机维修间隔优化;

张 军(1978-),男(汉族),辽宁沈阳人,博士,研究方向:航空维修运营管理;

张伟刚(1975-),男(汉族),陕西汉中,博士,讲师,研究方向:飞机维修管理技术。