

飞机视情维修策略及模型研究

Research on Condition-Based Maintenance Strategy and Model

李郑琦 / 中国飞行试验研究院 陈跃良 / 海军航空工程学院青岛分院

摘 要: 首先介绍了飞机视情维修策略的基本理论和关键技术, 然后针对目前飞机视情维修检测周期决策缺乏理论支持, 只能依据经验进行判定的现状, 基于延迟时间模型理论, 以系统潜在故障状态以及P-F间隔为出发点, 以功能故障发生的风险小于可接受水平为目标, 建立了单部件系统检测周期决策风险模型。着重考虑了由于检测设备及人为因素造成检测不完备性对风险模型的影响, 可有效地帮助决策者制定合适的维修周期。

关键词: 视情维修; P-F间隔; 风险模型; 检测周期

Keywords: condition-based maintenance; P-F interval; risk model; inspecting periods

0 引言

维修是保持、恢复乃至提高航空部队战斗力的重要因素。在海湾战争中, 美军通过有效的维修保障和及时战场抢修使F-15E和F-16战斗机的战备完好率分别高达95.5%和95.4%。在高技术条件下的局部战争中, 保持部队的战斗力将更加依靠武器装备“战斗力再生”, 更加依赖于维修保障。因此, 世界各国军队都非常重视武器装备维修, 美军每年的装备维修费用高达200多亿美元, 20世纪80年代以来维修费接近装备研制费和采购费之和, 其装备维修费约占国防费用的14.2%。

视情维修是指检查军机系统的潜在故障, 以便采取措施预防功能故障或避免功能故障所进行的维修^[1-3]。相对于传统的定期维修而言, 视情维修可以防止飞机过维修和欠维修, 有效地降低维修成本, 提高检查质量和系统利用率, 能有效地预防偶然故障, 提高维修的有效性和经济性。本文在以往研究的基础上介绍了视情维修的理论基础和关键技术, 并利用延迟时间模型理论, 建立

可接受风险检测周期决策模型。

1 时间延迟模型

时间延迟模型是把系统的寿命周期分为缺陷形成阶段和故障发生阶段。图1表示系统由完好状态到发生潜在故障, 最终发展为功能故障的过程。A点为新系统服役或系统经过检修后服役的状态点; B点为故障开始发生点; P点为能探测到的潜在故障点; F点为功能故障点。P-F间隔表示在不采取任何检修措施情况下, 由潜在故障发展到功能故障之间的间隔。为了减少系统功能故障的发生, 需定期安排对系统的检测工作, 以便在出现功能故障前就对系统进行预防性维修。为此采用如下的检测策略:

1) 在检测时, 如系统处于正常状态, 则进行一些必要的润滑保养维护, 系统继续使用;

2) 在检测时, 如系统处于潜在故障状态, 应对系统进行预防性更

换维修;

3) 在使用中系统出现功能故障, 应对系统进行故障更换。

2 视情维修中的状态检测

视情维修依赖于潜在故障的检测, 潜在故障发现越早, P-F间隔期越长。P-F间隔期长就意味着无需经常进行检测, 或有更多的时间采取措施避免故障后果。所以, 维修人员需要花费很大精力限定潜在故障的状态, 极力开发能够提供尽可能长的P-F间隔期的检测潜在故障的技术^[4]。图2表明P-F间隔期长就意味着在P-F曲线上较高的位置处将潜在故障检测出来, 要求用于检测

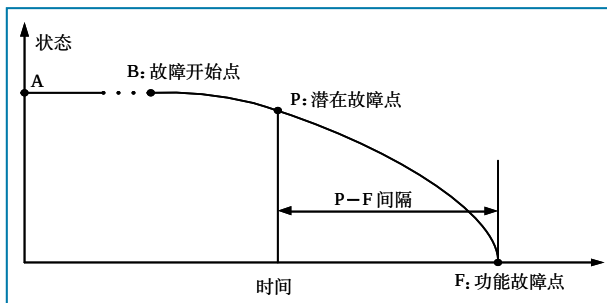


图1 P-F曲线示意图

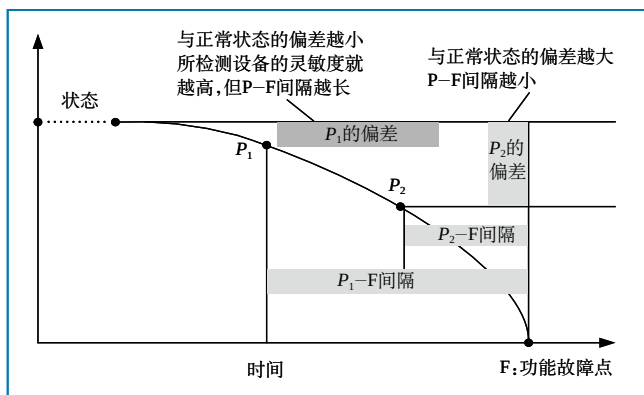


图2 P-F间隔与“正常”状态的偏差

潜在故障的监测技术更加灵敏。现在普遍应用的是对于主要参数进行监控的状态监测技术。通过状态监测技术,分析系统的振动和温度等参数的变化趋势,进而获得系统的故障状态,更加清晰地了解故障规律,准确地确定P-F间隔期。充分发挥状态监测技术的优势,对于潜在故障的P-F间隔期的确定有着非常重要的意义。

无损检测技术(NDT)在飞机结构状态检测中得到越来越多的应用,无损检测以不改变被检测对象的状态和使用性能为前提,测定结构性能和内在各种缺陷,借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性以及适用性。最常用的NDT方法有超声检测、涡流检测、渗透检测、射线检测。

3 视情维修故障预测技术

故障预测技术使得系统维护人员可以预知故障的发生,从而采取一系列维修或预防的措施,而不必等到故障真正发生之后再做出反应。故障预测技术的研究内容主要包括:

1) 评价当前装备系统处于状态退化过程中的状态(正常状态、性能下降状态或者功能失效状态)。

2) 当装备系统处于性能下降状态时,判断系统是由何种故障模式引起的,并且评价当前的状态偏离正常状态的程度的大小。

3) 预测系统未来的状态变化,研究未来的一段时间(下一检测周期内)系统是否能正常的完成其功能以及剩余寿命的大小。

从实际研究中应用较广泛的理论、方法和技术路线来看,故障预测技术主要可以分为基于模型的故障预测技术、基于知识的故障预测技术和基于数据的故障预测技术三类^[5-6]。国内对于故障预测技术的研究目前正处于起步阶段,主要的研究工作是实现对系统故障的早期发现和进行

有效预防,还没有上升到系统视情维修所要求的剩余寿命预测的阶段。

4 视情维修检测优化模型

4.1 模型的假设

1) 系统的潜在故障状态不会在系统使用过程中被发现,只有通过检测才能获知,而功能故障在使用过程中被发现。

2) 被研究系统只有一种主导性故障模式,属于单部件系统。系统经预防性维修后恢复到新品状态,即恢复如新。

3) 为了研究检测模型,假定系统潜在故障发生时间为 U ,其概率密度函数为 $g(u)$;由潜在故障发展到功能故障的延迟时间为 H ,其概率密度函数为 $f(h)$ 。

4) 实施定期检测,由于检测设备误差和技术人员失误造成检测的不完备性^[7-8]。使得系统的潜在故障不能完全的检测出来,假定检测潜在故障的概率为 P 。

4.2 检测优化模型的建立

建模过程中,故障更新和预防性维修发生的概率是关键数据。依据延迟时间模型建模原理,对两种更新事件发生概率的分析与计算如下^[9]:

已知在系统更新后 t_i 时刻实施检测, $t_i = iT_{SC}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。假设潜在故障发生在 $(u, u+du)$, $t_{j-1} < u < t_j$ 。如果延迟时间 $t_{j-1} - u < h < t_{i-1} - u$,系统将在第 i 检测时刻 t_i 之前发生功能故障而进行故障更新;如果延迟时间 $h \geq t_i - u$,在 t_i 检测时将以概率 P 检测出潜在故障而进行预防性维修。

由此,得到在 (t_{i-1}, t_i) 内发生故障更新的概率为 $P_f(t_{i-1}, t_i)$ 为:

$$P_f(t_{i-1}, t_i) = \sum_{j=1}^i (1-p)^{i-j} \int_{t_{j-1}}^{t_j} g(u) [F(t_i - u) - F(t_{i-1} - u)] du \quad (1)$$

在 t_i 时刻进行预防性维修的概率为:

$$P_p(t_i) = \sum_{j=1}^i (1-p)^{i-j} p \int_{t_{j-1}}^{t_j} g(u) [1 - F(t_i - u)] du \quad (2)$$

4.3 风险模型

在相同的观察期 t 内,不同的检测周期将导致系统不同的故障风险。在观察期 t 内,不发生功能故障的事件分为进行过预防性维修和未进行过预防性维修两类。图3为各事件发生示意,其特征及发生概率确定如下:

1) 事件A:未发生任何更新事件。包括 t 时刻前未发生潜在故障(情况1),以及潜在故障发生在 $[t_{i-1}, t_i]$ 之内,在第 i 次到第 k 次检测中未发现潜在故障,在 t 时刻前没有发生过功能故障(情况2),即 $(U \geq t) \cup (t_{i-1} < U < t_i \cap U + H > t)$ 。事件A的概

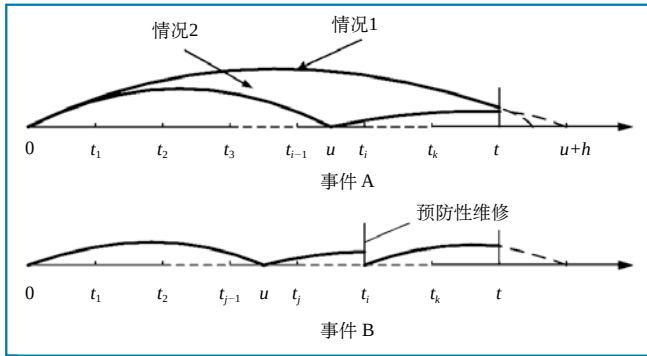


图3 观察期 t 内设备未发生功能故障事件的示意

率为:

$$P(A) = \begin{cases} 1 - \int_0^t g(u) du + \int_0^t g(u) [1 - F(t-u)] du & (t \leq t_1) \\ 1 - \int_0^t g(u) du + \sum_{i=1}^k (1-p)^{k-i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u) [1 - F(t-u)] du & (t > t_1) \end{cases} \quad (3)$$

2) 事件B: 发生过预防更新事件。首次潜在故障发生在 $(u, u+du)$, $t_{j-1} < u < t_j$ 且 $j \leq K$ 。潜在故障在第 i 次检测时被发现并进行首次预防性维修, 而在剩余时间 (t_i, t) 内没有发生功能故障, 即 $(t_{j-1} < U < t_j \cap U + H \geq t_i) \cap ((t_i, t)$ 内未发生功能故障)。由于假设系统恢复如新, 故剩余时间内的事件发生情况等同于 $(0, t-t_i)$ 。综合所有可能, 事件B的概率为:

$$P(B) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^i (1-p)^{i-j} \left\{ \int_{t_{j-1}}^{t_j} g(u) [1 - F(t-u)] \bar{P}_b(t-t_i) du \right\} \quad (4)$$

由以上分析得到 $[0, t]$ 内系统不发生功能故障的概率为:

$$\bar{P}_b(t) = P(A) + P(B) \quad (5)$$

发生功能故障的风险为:

$$P_b(t) = 1 - \bar{P}_b(t) \quad (6)$$

将式(3)~(5)代入(6), 得:

$$P_b(t) = \begin{cases} \int_0^t g(u) du - \int_0^t g(u) [1 - F(t-u)] du & (t \leq t_1) \\ \int_0^t g(u) du - \sum_{i=1}^k (1-p)^{k-i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u) [1 - F(t-u)] du - \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{i-1} (1-p)^{i-j} \left\{ \int_{t_{j-1}}^{t_j} g(u) [1 - F(t_i-u)] \bar{P}_b(t-t_i) du \right\} & (t > t_1) \end{cases} \quad (7)$$

对于定期检测策略, 如果潜在故障时间分布函数 $g(u)$ 、延

迟时间分布函数 $f(h)$ 已知。由式(7)能够确定观察期 t 内系统发生功能故障的风险, 通过满足 $P_b(t) \leq [P_a]$ 可以得到最佳检测周期。

5 结束语

本文介绍了飞机视情维修策略基本理论、关键技术, 应用延迟时间模型的基本原理, 建立了单部件系统视情维修风险模型, 为视情维修检测周期决策提供了定量化方法, 为视情维修策略在飞机维护体系中的应用, 充分发挥飞机的使用功效、保障飞行安全提供了理论支持。此外, 还考虑了检测效果的影响, 但对于实际维修中存在的最小维修和不完全维修的情况有待考虑到模型中, 进行更深入的研究。

AST

参考文献

- [1] 以可靠性为中心的维修[M]. 北京: 总装备部技术基础管理中心, 2003.
- [2] 董广生, 刘继民. 提高产品可靠性: 延迟时间内的检测与维修[J]. 机械研究与应用, 2002, 15(4): 33~37
- [3] 梁工谦, 陈翔宇. 视情维修中的设备维修模式权衡分析[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(4): 504~507
- [4] 姚晨榕. 基于状态的民航发动机维修管理研究[D]. 南京航空航天大学硕士论文, 2006.
- [5] Qiu J, Zhang C, Seth B, Liang S Y. Damage mechanics approach for bearing lifetime prognostics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(5): 817~829.
- [6] 梁旭, 李行善, 张磊, 于劲松. 支持视情维修的故障预测技术研究[J]. 测控技术, 2007, 26(6): 5~8
- [7] THOMAS S C, GAVER D P, JACOBS P A. Inspection models and their application[J]. IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, 1991, 34(3): 283~304
- [8] 蔡景, 左洪福, 王华伟. 时间延迟的系统检测优化模型[J]. 应用科技学报, 2007, 25(4): 397~401.
- [9] 马晓芳, 高学东, 贾希胜, 刘春文. 发电设备点检周期模型[J]. 中国电力, 2007, 40(11): 67~71.

作者简介

陈跃良, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞机结构疲劳寿命、腐蚀防护和维修决策。