

军用飞机无维修工作期参数分解方法研究

孙华荣, 王礼沅*, 孙蛟, 虞健飞

北京航空工程技术研究中心, 北京 100076

摘要: 针对目前军用飞机设计中无维修工作期(Maintenance-free Operating Periods, MFOP)指标无法分解和落实的问题, 通过对基本可靠性、故障预测、系统重构和冗余设计等影响军用飞机 MFOP 实现的主要因素进行分析和数理建模, 提出了一种军用飞机 MFOP 参数的分解流程和方法, 为 MFOP 由使用参数(使用要求)向合同参数(设计要求)的分解提供初步的方法基础, 能够为军用飞机的 MFOP 指标分析论证和基于 MFOP 的飞机可靠性设计工作提供一定的理论指导。

关键词: 可靠性; 无维修工作期; 军用飞机; 数理建模; 分解方法

中图分类号: V271.4; TB114.3

文献标识码: A

传统的可靠性理论认为飞机系统及其设备出现随机故障或失效是正常的、可接受的, 同时也是不可避免的, 这种观念导致了许多飞机的非计划性维修, 降低了飞机的可用性, 而且非计划维修成本也远高于计划维修。针对此问题, 空中客车公司提出了一种新的可靠性概念——无维修工作期(Maintenance-free Operating Periods, MFOP), 并将这种新概念应用于其生产的商用飞机上, 现在也被应用于多种军用飞机, 如 A400M 和 F-22 等^[1]。

目前, 国内航空工业部门也开始接受这种新的可靠性概念, 并尝试在军用飞机研制中开展应用。然而, MFOP 是与飞机战备完好性、维修保障费用密切相关的顶层使用参数, 但使用参数不能直接用于设计, 如果仅仅提出 MFOP 指标要求, 而不转换成相应合同参数的指标要求(设计要求), MFOP 概念及目标的提出将流于形式, 无法牵引并约束装备设计, 当然也无法考核和验收^[2]。本文通过 MFOP 参数分解方法研究, 对影响 MFOP 的主要因素进行参数建模和分析, 并提出一

种参数分解流程和方法, 为 MFOP 由使用参数向合同参数分解提供一定的方法基础, 支持军用飞机 MFOP 指标分析论证、试验验证工作的开展。

1 MFOPS 的影响因素分析

MFOP 是产品能够完成所有规定任务的使用周期, 在该周期内无需任何的维修活动, 也没有因系统故障或性能降级导致对用户的使用限制。

MFOP 是传统质保期概念的拓展, 它从用户角度出发, 将现有的质保期扩展到产品的全寿命。在每一个 MFOP 内以一定的置信度保证产品零部件工作正常, 这个置信度用无维修工作期生存度(Maintenance-free Operating Period Survivability, MFOPS)来衡量, 其定义为产品在规定的工作环境下, 在 MFOP 内能正常工作, 无需进行任何非计划性维修的概率^[3-4]。每个 MFOP 期间, 通过适当的计划性或修复性维修使系统完全恢复到可使用状态, 以使其能够顺利完成下一个 MFOP 的工作。

如图 1 所示, 可将 MFOP 看做一个系统安全

收稿日期: 2011-04-13; 退修日期: 2011-05-30; 录用日期: 2011-07-18; 网络出版时间: 2011-08-31 13:20

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110831.1320.002.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110831.1320.002

* 通讯作者. Tel.: 010-66713989 E-mail: wangly1223@sohu.com

引用格式: Sun H R, Wang L Y, Sun J, et al. Research on maintenance-free operating periods decomposition approach for military aircraft. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(1): 85-93. 孙华荣, 王礼沅, 孙蛟, 等. 军用飞机无维修工作期参数分解方法研究. *航空学报*, 2012, 33(1): 85-93.

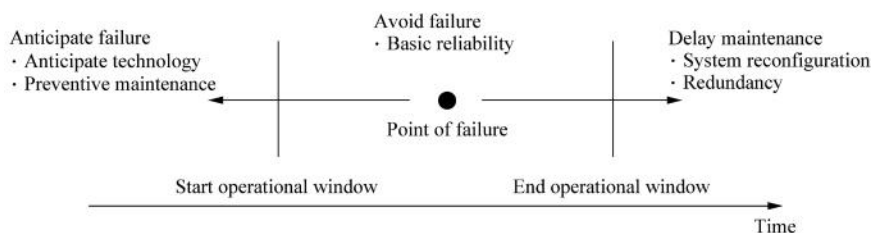


图 1 实现 MFOP 的基本思路

Fig. 1 Basic thinking for achieving MFOP

运行的时间窗口,在一定的置信度要求下,为了实现或增加这一窗口的时间跨度,在工作期内,在飞行安全得到保证的情况下,应该尽可能减少和避免故障并容纳已经发生的故障^[5-6]。为了实现这一要求,可从以下 3 个方面考虑:

① 避免故障。提高系统或组件的基本可靠性,降低故障概率,最大限度地减少工作期内发生的故障。

② 预测故障。应用预测技术和预防性维修,提前更换未来工作期内可能发生故障的部件,消除故障隐患,从而避免使用期内出现故障。

③ 容纳故障。综合应用冗余设计、诊断技术和重构技术,发现并容纳工作期内产生的故障,推迟修复性维修活动,直到本次 MFOP 结束。

由上述分析可知,MFOP 的影响因素主要有基本可靠性、故障预测能力、预防性维修、系统冗余设计和重构设计。

文献[7]和文献[8]建立了基本可靠性和预防性维修策略与 MFOP 参数的关系模型,以 N 个部件组成的串联系统为例,第 k 个部件在第 i 个工作期的 MFOPS 可表示为

$$P_{\text{MFOPS}}^k(i) = P[T > it_{\text{mf}} \mid T > (i-1)t_{\text{mf}}] = \frac{R_k(it_{\text{mf}})}{R_k[(i-1)t_{\text{mf}}]} \quad (1)$$

式中: T 为部件无故障工作总时间; t_{mf} 为一个 MFOP 的时长; R_k 为第 k 个部件的可靠度,则该系统在此期间的 MFOPS 为

$$P_{\text{MFOPS}}(i) = \prod_{k=1}^N P_{\text{MFOPS}}^k(i) = \prod_{k=1}^N \frac{R_k(it_{\text{mf}})}{R_k[(i-1)t_{\text{mf}}]} \quad (2)$$

由式(2)可知,在不考虑其他因素时,MFOPS 与系统各组成部件的可靠度有关。这里的可靠度不仅包括其均值,还涉及到故障分布规律。

文献[7]还以上述模型为基础,对预防性维修

时机的确定进行了分析。为从参数分解角度开展基于 MFOP 的飞机可靠性设计奠定了理论基础,但是文献[7]没有把故障预测、系统重构和冗余设计等考虑到模型中去,不能够支撑新一代飞机的可靠性设计工作。本文在此基础上建立模型开展进一步的研究,以确定故障预测能力、系统重构能力和冗余设计与 MFOP 的关系,并基于所建立的模型,研究出一套基于 MFOP 的军用飞机可靠性设计方法。下面对这些因素进行分析和建模。

2 影响因素与 MFOPS 的关系建模

2.1 故障预测参数

1) 故障预测参数分析

故障预测被定义为能够识别即将发生的系统故障,与此同时还能够合理地预测失效发生的时间^[9]。维修人员通过故障预测提供的信息,可以采取适当的维修活动。对于 MFOP 的实现来说,维修人员可以根据故障预测信息,在维修恢复期(MRP)对将在工作期发生的、并影响任务成功的故障件进行提前更换,从而提高 MFOPS。

新型航空装备的故障预测能力是依靠故障预测与健康管理系统(Prognostic and Health Management, PHM)系统、中央维护系统(Central Maintenance System, CMS)等新系统来实现的,但到目前为止,PHM 和 CMS 的故障预测能力还缺乏一组标准度量以正确评估^[10]。

为了研究的方便,本文给出一个故障预测的度量——预测成功概率(P_{HS}):在系统工作的任意时间 t ,系统的故障预测子系统(CMS 或 PHM)对下一个规定工作时间 L 内将要发生的故障实现成功预测的概率,即

$$P_{\text{HS}} = \frac{N_{\text{H}}}{N_{\text{F}}} \quad (3)$$

式中: N_H 为在时间段 L 内被成功预测的故障数; N_F 为在时间段 L 内实际发生的故障数。预测成功率可以通过测试性试验来评估。

这里没有考虑虚警,因为如果虚警导致部件的更换,只会导致 MRP 期间维护工作量的增加,而不会导致 MFOPS 的下降。

2) 故障预测能力与 MFOPS 关系分析

对预测成功率对 MFOPS 的影响进行分析,假设如果在 MRP 中对 MFOP 将要发生的故障进行成功预测后,立即采取维修措施,更换将要发生故障的部件,防止故障的发生,那么就必然提高 MFOPS。

假设对具有 N 个样本的某分系统或设备的第 i 个 MFOP 进行统计, MFOPS 为 $P_{MFOPS}(i)$, 那么,就有 $N(1-P_{MFOPS}(i))$ 个样本在第 i 个工作期因故障而失败。

另假设只要预测到故障发生即进行成功维修,那么失败工作期中就有 $N(1-P_{MFOPS}(i))P_{HS}$ 个样本因为成功预测并被修复如新。考虑到这 $N(1-P_{MFOPS}(i))P_{HS}$ 个被更换的样本,在系统的第 i 个 MFOP,经历的实际上是它的第 1 个 MFOP,在此工作期里,其 MFOPS 为

$$P_{MFOPS}(1) = R(t_{mf}) \quad (4)$$

对于服从威布尔分布的部件来说,有

$$P_{MFOPS}(1) = \exp\left(-\frac{t_{mf}^m}{\eta^m}\right)$$

式中: m 为形状参数; η 为尺度参数。

通过上述分析,把 $P_{MFOPS}(i)$ 修正为

$$P'_{MFOPS}(i) = \frac{N(1-P_{MFOPS}(i))P_{HS}R(t_{mf}) + NP_{MFOPS}(i)}{N} = P_{MFOPS}(i) + P_{HS}R(t_{mf})(1-P_{MFOPS}(i)) \quad (5)$$

2.2 系统重构参数

系统重构是在对系统的功能任务和体系结构深刻认识的基础上,以基于模块的故障检测与诊断技术为前提,通过完善的系统逻辑来实现资源的高度共享和提高任务可靠性的一门综合技术,对于提出 MFOP 要求的军用飞机来说,也是达到 MFOP 指标的关键技术。

可重构系统由于引入了故障检测、隔离及重构技术,故障检测的精确程度与故障隔离重构的成功与否都会对其可靠性产生影响^[11],应在进行

可靠性估算建模时加以考虑。下面参考文献[12]的方法,分别对这 3 个因素进行分析和建模。

1) 故障检测率

可重构系统的检测率定义为故障发生时,被机内测试(BIT)发现和准确定位的故障的比率,即

$$K_x = \text{发现故障次数} / \text{发生故障次数} \quad (6)$$

$K_x = 100\%$ 时,意味着所有故障都可以及时、准确地被发现、定位和报告。

2) 隔离成功率

可重构系统的隔离成功率定义为检测率为 100% 时,发生的故障被成功隔离的比率,即

$$K_s = \text{成功隔离故障数} / \text{发生故障数} \quad (7)$$

$K_s = 100\%$ 时,意味着所有被发现的故障都能够被成功隔离。

3) 重构成功率

在故障检测率和隔离成功率都为 100% 时,重构成功的比率定义为

$$K_{ch} = \text{重构成功次数} / \text{发生故障数} \quad (8)$$

重构成功指的是重构至满足任务需求的状态,这个指标可以采用测定一定数量样本中一次故障后重构成功的样本数来评定,也可以测定一个系统多次发生故障,重构成功的次数来评定,但每次发生故障后应进行修复,此处假定每次修复都为“修复如旧”,即修复前后系统可靠度不变。

那么可重构系统任务可靠度 R_{ch} 在传统的任务可靠度 R 基础上,修正为

$$R_{ch} = R + K_x K_s K_{ch} (1 - R) \quad (9)$$

需要说明的是,由于前面的假定,式(9)没有考虑重构资源减少对重构能力的影响。

考虑到在 MFOP 内,系统经过一次重构后,不进行修复,系统重构所需资源下降,重构能力也会相应下降,假定这是一个线性下降过程。

为建立系统已发生故障次数与重构能力的关系,首先定义一个变量——系统最大重构次数 $N_{ch,max}$,即系统发生多次故障后,重构可利用资源耗尽,系统重构能力下降为零时所对应的系统重构次数。

在 $t_0 \sim t$ 期间,系统期望发生的故障数为

$$N(t) = \int_{t_0}^t \lambda(t) dt = \int_{t_0}^t \frac{f(t)}{R(t)} dt \quad (10)$$

式中: $f(t)$ 为故障分布密度函数。

在 MFOP 开始前,系统的可靠度为 $R(t)$ 。
经过 t_{mf} 后,系统期望发生的故障数为

$$N(t+t_{mf}) = \int_t^{t+t_{mf}} \lambda(t) dt = \int_t^{t+t_{mf}} \frac{f(t)}{R(t)} dt \quad (11)$$

在 $t+t_{mf}$ 时,系统可靠度函数为

$$R_{ch}(t+t_{mf}) = R(t+t_{mf}) + K_x K_s K_{ch} \cdot \frac{N_{ch,max} - N(t+t_{mf})}{N_{ch,max}} (R(t) - R(t+t_{mf})) \quad (12)$$

式(12)右侧第 2 项的含义为在 MFOP 中系统重构所带来的任务可靠度的增加量。

依据式(1)对重构能力与 MFOP 的关系进行研究,同样以各部件寿命分布为威布尔的串联系统为例。各部件寿命分布为威布尔分布,那么式(11)可转换为

$$N(t+t_{mf}) = \int_t^{t+t_{mf}} \frac{m}{\eta} t^{m-1} dt = \frac{1}{\eta^m} ((t+t_{mf})^m - t^m) \quad (13)$$

依据式(1),当 $N_{ch,max} > N(t+t_{mf})$,即重构资源所保证的最大可重构次数大于在 t_{mf} 期间系统期望故障次数时,有

$$P_{MFOPS}^k(t) = \frac{R(t+t_{mf})}{R(t)} = \frac{R_{ch}(t+t_{mf})}{R(t)} = \frac{K_x K_s K_{ch} \left\{ N_{ch,max} - \left\{ \frac{1}{\eta^m} [(t+t_{mf})^m - t^m] \right\} \right\}}{N_{ch,max}} \cdot \left(1 - \frac{R(t+t_{mf})}{R(t)} \right) + \frac{R(t+t_{mf})}{R(t)} \quad (14)$$

当 $N_{ch,max} \leq N(t+t_{mf})$ 时,重构次数不足以满足系统期望故障次数,系统失去重构能力,此时

$$P_{MFOPS}^k(t) = \frac{R(t+t_{mf})}{R(t)} \quad (15)$$

2.3 冗余设计参数

冗余设计有许多类型,常见的有热储备和冷储备^[13-14]。

热储备:组成部分处于激活和未被激活状态具有同样的故障特性,组成部分只有在系统有需求时才发挥作用,这种结构称做热储备。

冷储备:组成部分在被激活进入使用状态前具有零故障概率。

下面以冷储备为例对系统可靠度进行分析。

首先分析系统由 2 个部件组成的情况。在初始时刻,一个部件开始工作,另一部件作冷储备,当工作部件失效时,用储备部件进行替换,储备部件失效时,系统失效。

对有 N 个子样样本的某分系统或设备的第 i 个 MFOP 进行统计,无维修工作期生存度为 $P_{MFOPS}(i)$,那么,就有 $N(1-P_{MFOPS}(i))$ 个样本在第 i 个 MFOP 中发生故障需要维修。

而此 $N(1-P_{MFOPS}(i))$ 个故障发生的时间服从该分系统的寿命分布,但由于采用的 N 个子样样本是从前面 t 时间段里未发生故障的样本中抽取的,因此,分布密度函数应修正为 $f'(t) = f(t)/R(t_0)$, t_0 为第 i 个工作期开始时系统的已工作时间。那么,在 t 时刻开始的 Δt 时间段里,期望的发生故障数为 $N f'(t) \Delta t = N(f(t)/R(t_0)) \Delta t$ 。在 t 时刻后的 Δt 时间段里,由于具有冷备份,在不影响安全的情况下,所发生的故障可以不进行维修,继续使用到备份件发生故障,如果备份部件在余下的 $t_0+t_{mf}-t$ 时间里发生故障,那么 MFOP 失败,冷备份部件在余下的 $t_0+t_{mf}-t$ 时间里发生故障的概率为 $F(t_0+t_{mf}-t)$ 。由上述分析进一步推出,在 t 时刻后的 Δt 时间段里,原部件发生故障、且在 t_{mf} 期间其冷备份部件最终也发生故障的概率为 $(f(t)/R(t_0)) \Delta t F(t_0+t_{mf}-t)$,那么在整个 MFOP 中,原部件和备份部件都发生故障的概率为

$$\int_{t_0}^{t_0+t_{mf}} (f(t)/R(t_0)) F(t_0+t_{mf}-t) dt$$

综上所述,增加一个冷备份后,有

$$P'_{MFOPS}(t_0) = 1 - \int_{t_0}^{t_0+t_{mf}} \frac{f(t)}{R(t_0)} F(t_0+t_{mf}-t) dt \quad (16)$$

热备份与冷备份的分析过程类似,经分析可以得到二余度热备份系统的 MFOPS 为

$$P'_{MFOPS}(t_0) = 1 - \int_{t_0}^{t_0+t_{mf}} \left(\frac{f(t)}{R(t_0)} F(t_0+t_{mf}-t) \right) dt \quad (17)$$

3 MFOP 参数分解过程

前面对 MFOPS 与各单项影响因素的关系进行了分析和建模。下面,基于前面所建立的模型对飞机总体 MFOP 指标要求进行分解,主要是分解到系统的基本可靠性要求、故障预测能力要求、系统重构能力要求、系统冗余设计和预防性维修

规划上来,以指导飞机可靠性论证与设计。

总体思路如图 2 所示。

3.1 总体思路

根据文献[7],系统的基本可靠性和在使用过程中提前更换不符合要求的部件是实现 MFOP 的基本方法,那么按照以下步骤开展参数分解:

1) 获取系统各设备可靠性设计指标的目标值,并参考相似设备的历史故障数据,确定其寿命分布参数。

2) 利用前面所建立的模型确定系统初始方案(可靠性目标值、系统初步的故障预测、重构和冗余设计)下的系统 MFOP 参数初始值(系统处于寿命的零点,即装备开始工作的时间点)和变化趋势。

3) 对 MFOP 参数初始值与 MFOP 要求进行比较,如果初始值高于 MFOP 要求,那么考虑采用预防性维修的方式保证在装备使用的全程达到 MFOP 要求。但是,预防性维修要考虑一个成本问题,如果提前更换产品的代价过大,那就需要分析系统特点,考虑调整系统预测能力、系统重构能力或采取冗余方式来实现 MFOP 研制要求。

4) 如果初始值就达不到 MFOP 研制要求,根据 MFOPS 在装备全寿命中递减的规律,直接调整系统预测能力、系统重构能力或采取冗余方式来提高系统的 MFOP,使 MFOP 初始值高于 MFOP 的研制要求。

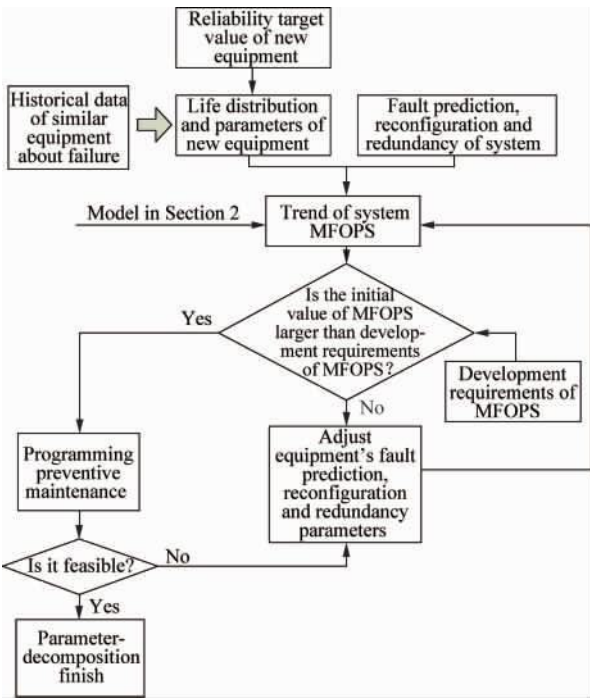


图 2 MFOP 参数分解思路

Fig. 2 Process of MFOP parameter-decomposition

3.2 示例分析

假设某军用飞机所属系统有 10 个部件串联,各设备的相关参数如表 1 所示。

表 1 设备参数
Table 1 Parameters of equipment

Part	Life distribution parameters of similar equipment		Reliability target value/h	Life distribution parameters of new equipment		P_{Hs} of 150 h	K_x	K_s	K_{ch}	$N_{ch,max}$	Redundancy
	Scale parameter	Shape parameter		Scale parameter	Shape parameter						
1	1 900	1.0	2 150	2 150.0	1.0	0.5	0	0	0	0	No backup
2	2 145	2.0	2 290	2 584.0	2.0	0.5	0	0	0	0	No backup
3	2 128	3.0	2 500	2 799.6	3.0	0.5	0	0	0	0	No backup
4	2 097	4.0	3 250	3 585.6	4.0	0	0.95	0.65	0.71	1	No backup
5	876	3.0	1 500	1 679.8	3.0	0	0	0	0	0	Cold backup with one element
6	1 580	2.5	2 600	2 930.4	2.5	0	0.72	0.80	0.63	1	No backup
7	5 200	3.0	8 000	8 958.8	3.0	0	0.95	0.65	0.71	1	No backup
8	3 200	4.0	4 500	4 964.7	4.0	0	0	0	0	0	Active backup with one element
9	1 250	2.0	1 500	1 692.6	2.0	0	0.83	0.75	0.93	1	No backup
10	3 520	1.0	4 000	4 000.0	1.0	0.5	0	0	0	0	No backup

1) 分布参数的确定

首先,给出如何参考相似部件历史数据来确定新部件的寿命分布参数:

假设一个新部件,平均寿命(或故障间隔时间)指标要求为 2 500 h,今有一相似部件,其寿命分布服从威布尔分布,尺度参数为 2 128,形状参数为 3,那么其平均寿命(或故障间隔时间)则为 $\eta\Gamma((1/m)+1)$, $\Gamma((1/m)+1)$ 为伽马函数,可以查伽马函数表获得取值,这里平均寿命为 1 900.3 h。

对于威布尔分布,形状参数决定了故障率随时间的变化趋势,假定设备与相似设备有相同的故障率变化趋势,即形状参数相同;而尺度参数则决定了其分布曲线坐标轴的标尺比例,即决定了平均寿命的长短^[15]。

根据上述分析,新部件的尺度参数为 $2\,128 \times 2\,500/1\,900.3 = 2\,799.6$,形状参数为 3。

根据上述方法,计算出 10 个部件的寿命分布参数,结果填入表 1。

2) 设备 MFOP 为 150 h 的 MFOPS 计算.

依据文献[7]中的模型,对具有表 1 中所列数据设计特点的系统 MFOPS 进行计算评估, MFOP 为 150 h,得到 10 个部件和系统的 MFOPS 变化趋势(由于篇幅所限,本文没有一一列出每一部件的趋势图)。

根据 3.1 节中的总体参数分解思路,要求该系统 MFOP 为 150 h 时的 MFOPS 要高于 0.95,经计算,系统初始的 MFOPS 为 0.94,不满足要求。那么就要考虑调整系统设计参数(故障预测能力、系统重构能力和冗余设计)来提高系统的 MFOPS。

通过对单个部件 MFOPS 趋势分析可知,部件 2 到部件 10 的初始 MFOPS 较高,提高难度较大,因此,可以对部件 1 进行参数调整,把其 150 h 预测成功率从 0.5 提高到 0.85,得到 MFOPS 趋势如图 3 所示。

此时,系统初始 MFOPS 达到 0.96,满足 MFOPS 研制指标要求,此时,再考虑在系统使用中,更换不合要求的部件使得系统一直满足 MFOPS 为 0.95 的要求。观察图 3,当系统工作到 150 h 时, MFOPS 下降到 0.947,因此,需要考虑更换部件,提高系统的 MFOPS。根据 10 个部件的 MFOPS 在 1 000 h 内的变化趋势,150 h 时,部件 9 的 MFOPS 最小,那么更换掉部件 9。

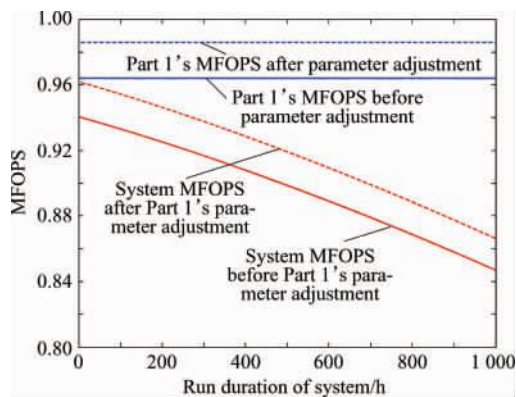


图 3 调整部件 1 的参数前后系统 MFOPS 的趋势
Fig 3 Trend of system MFOPS before and after Part 1's parameter adjustment

在 150 h 时更换掉部件 9 后,系统 MFOPS 超过了 0.95。这里需要说明的是,某工作时刻的 MFOPS 含义为从该时刻开始一个 MFOP,这个 MFOP 所对应的 MFOPS,也就是说在 150 h 更换掉部件 9 后, MFOPS 超过 0.95,即保证在系统的下一个 150 h 里,不发生维修换件的概率为 0.95。

当系统完成第 2 个 MFOP (300 h) 后, MFOPS 下降为 0.944,那么需要在此时再次更换不符合要求的部件来使系统 MFOPS 重新达到 0.95,这里,更换掉部件 2;当系统工作到 450 h 时,系统 MFOPS 下降为 0.937,此时,部件 9 的 MFOPS 最小,对其进行更换;依此类推,600 h 时,对部件 2 和部件 6 进行更换,750 h 时,对部件 9 进行更换;900 h 时,对部件 3 和部件 9 进行更换,即可使系统满足 MFOP 指标要求,得到如图 4 所示的 MFOPS 趋势图。

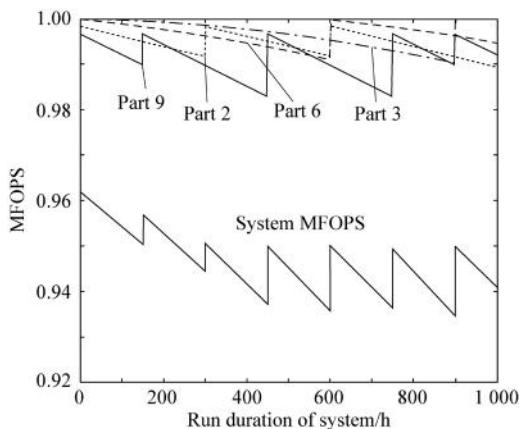


图 4 规划预防性维修后的系统 MFOPS 趋势
Fig 4 Trend of system MFOPS after preventive maintenance programming

从图4中可以看出,在前1 000 h里,系统共实施了7次MFOP, MFOPS每次都能达到0.95的要求,但是,这里要考虑经济可行性的问题,为了实现0.95的目标,一共对部件2进行了2次更换,部件3进行了1次更换,部件6进行了1次更换,部件9进行了4次更换,每一次更换,实际上都是部件没有到达其自然寿命提前更换,这样就造成部件寿命的浪费,这里采用以下的简单方法进行一个粗略的经济性评估。

假设部件2成本为2 000元,部件3成本为5 000元,部件6成本为3 000元,部件9的成本为1 000元。部件2在第300 h和第600 h进行了更换(由于无法知道部件2实际能够工作多久,因此,这里用平均寿命作为参考,在统计分析时,这是有意义的^[16])。部件2的平均寿命是2 290 h,因此浪费的部件2寿命为 $(2\,290-300)+(2\,290-600)=3\,980$ h,折算成经济损失则为 $(3\,980/2\,290) \times 2\,000=3\,476$ 元;部件3平均寿命为2 500 h,部件3在900 h进行更换,浪费寿命为1 600 h,折算成经济损失为3 200元。依此类推,得到更换部件6的损失为2 307.7元,更换部件9的损失为3 400元。为实现MFOP目标,提前更换部件一共造成了12 384元的经济损失。

上述经济性评估结果可以用于更宏观的全寿命周期费用分析,可用于改进设计减少寿命损失所需费用与寿命损失造成的经济损失之间进行权衡,最终得到合理的系统MFOP参数要求。由于经济性分析涉及面广,本文仅作初步分析。

假如上述分析得到的经济损失可以被接受,那么,系统设计参数即被确定,参数分解结束。

假如上述分析得到的经济损失不可以被接受,那么,就需要进一步修改系统设计参数。从前面的分析可以看出,部件9的MFOPS下降速度最快,更换最为频繁,可以从它着手,部件9的设计参数表明其是一个可靠性水平不太高、但具备可重构能力的部件,可以考虑将其重构能力参数要求提高,比如,将隔离成功率由0.75提高到0.90,但是经过分析,系统MFOPS的提高并不能减少部件更换次数。因此,在此基础上再对部件10的设计参数进行调整,将其150 h的故障预测成功率提高到0.8。

在此基础上考虑预防性维修策略,在系统工作

的前300 h,系统150 h MFOP的MFOPS都高于0.95,但系统经过3个MFOP后, MFOPS低于0.95,即系统工作到450 h时需要更换部件,此时,部件9的MFOPS最小,考虑对其进行更换,更换部件9后系统MFOPS回升到0.95以上,系统再执行一个MFOP(150 h), MFOPS再次下降到0.95以下,此时考虑更换部件2,系统MFOPS上升到0.95以上,当系统再经过一个MFOP,即系统工作到900 h时,更换掉MFOPS最小的部件3和部件6,系统MFOPS达到0.95,通过这样的预防性维修策略,系统在前1 000 h里,实现了MFOPS为0.95的设计要求,如图5所示。

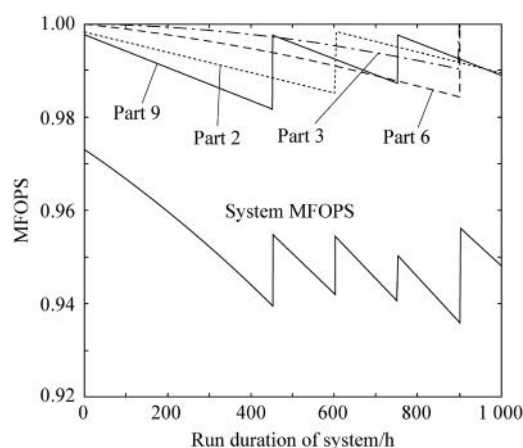


图5 规划预防性维修后的系统MFOPS趋势(考虑经济因素)

Fig. 5 Trend of system MFOPS after preventive maintenance programming (calculating economic losses)

通过经济性分析,预防性维修一共造成寿命损失约合7 837.5元,因此,要实现相同的MFOPS要求,通过参数指标要求的调整,寿命损失减少了 $12\,384-7\,837.5=4\,546.5$ 元,当然,这需要与指标要求调整后提高的研制费用进行权衡分析来确定系统设计方案。

从上述分析来看,系统MFOP指标要求的实现不仅要从系统设计入手,而且应考虑使用过程中的预防性维修策略,而预防性维修策略与费用相关,因此, MFOPS的指标要求应在一定的经济约束下提出。

通过上述参数分解流程可知,如果在一定的经济约束下实现了MFOPS指标要求,那么此时

系统各部件的相关参数便被确定,参数分解完成。 各部件参数指标要求见表 2。

表 2 参数分解完成后确定的各部件指标要求

Table 2 Design targets of every part determined after parameter-decomposition

Part	Life distribution parameters of similar equipment		P_{HS} of 150 h	K_x	K_s	K_{ch}	$N_{ch,max}$	Redundancy
	Scale parameter	Shape parameter						
1	2 150. 0	1. 0	0. 85	0	0	0	0	No backup
2	2 584. 0	2. 0	0. 50	0	0	0	0	No backup
3	2 799. 6	3. 0	0. 50	0	0	0	0	No backup
4	3 585. 6	4. 0	0	0. 95	0. 65	0. 71	1	No backup
5	1 679. 8	3. 0	0	0	0	0	0	Cold backup with one element
6	2 930. 4	2. 5	0	0. 72	0. 8	0. 63	1	No backup
7	8 958. 8	3. 0	0	0. 95	0. 65	0. 71	1	No backup
8	4 964. 7	4. 0	0	0	0	0	0	Active backup with one element
9	1 692. 6	2. 0	0	0. 83	0. 90	0. 93	1	No backup
10	4 000. 0	1. 0	0. 80	0	0	0	0	No backup

4 结 论

对 MFOP 参数分解方法进行了深入研究,给出了 MFOPS 的参数分解流程,利用上述方法和流程,可以对由多部件构成的系统进行 MFOP 参数分解,把使用要求转换成具体的军用飞机设计要求。

本文都是对系统从 0 时刻开始执行 MFOP 的方式进行分析,但实际的军用飞机作战和训练使用中,系统在执行 MFOP 之前可能已经工作过一段时间,或者是在现有装备上执行 MFOP,那么 MFOP 的开始时间就不会为 0,而且装机系统、设备和机件的已工作时间也会不一致,因此就需要进行更为复杂的分析,但总的分析思路与本文给出的思路基本一致。

参 考 文 献

- [1] Cini P F, Griffith P. Designing for MFOP: towards the autonomous aircraft. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1999, 5(4): 296-306.
- [2] Yang W M. Reliability maintainability and suportability pandect. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 47-48. (in Chinese)

杨为民. 可靠性维修性保障性总论. 北京: 国防工业出版社, 1995: 47-48.

- [3] Chew S P, Dunnett S J, Andrews J D. Phased mission modelling of systems with maintenance-free operating periods using simulated Petri nets. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(5): 980-994.
- [4] Kabashkin I. Discrete event model of maintenance free operating time for aerospace based telematics systems. *The 9th International Conference MMA2004*. 2004: 29-31.
- [5] Sun J, Yu J F. Research on concept and application of airplane MFOP. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2010 (2): 33-34. (in Chinese)
孙蛟, 虞健飞. 飞机 MFOP 概念与应用研究. *航空维修与工程*, 2010(2): 33-34.
- [6] Warrington L, Jones J A, Davis N. Modelling of maintenance, within discrete event simulation. *2002 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 2002: 260-265.
- [7] Long J. Research on RCM based on MFOP. *Science Technology and Engineering*, 2005, 15(5): 1108-1110. (in Chinese)
龙江. 基于 MFOP 的可靠性维修方案研究. *科学技术与工程*, 2005, 15(5): 1108-1110.
- [8] Kumar U D, Knezevic J, Crocker J. Maintenance free operating period—an alternative measure to MTBF and

- failure rate for specifying reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, 1999, 64(2): 127-131.
- [9] Jones J, Warrington L, Davis N. The use of a discrete event simulation to model the achievement of maintenance free operating time for aerospace systems. 2001 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001: 170-175.
- [10] Leao B P, Yoneyama T, Rocha G C, et al. Prognostics performance metrics and their relation to requirements, design, verification and cost-benefit. *International Conference on Prognostics and Health Management*. 2008: 325-327.
- [11] Yang B. Reconfigurable design in modular integrated systems. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(6): 45-48. (in Chinese)
杨斌. 模块化综合系统的重构设计. *电讯技术*, 2009, 49(6): 45-48.
- [12] Zhang P, Chen Z J. Reliability of the self-repairing flight control systems. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1999, 25(3): 260-263. (in Chinese)
张平, 陈宗基. 自修复飞控系统的可靠性估计. *北京航空航天大学学报*, 1999, 25(3): 260-263.
- [13] Wen X Y, Niu Z X, Shi Y J. The effect of power supply module redundancy heat backup on reliability. *Electric Product Reliability and Environmental Testing*, 2005(1): 16-18. (in Chinese)
- 温小云, 牛忠霞, 师宇杰. 电源模块冗余热备份对可靠性的影响. *电子产品可靠性与环境试验*, 2005(1): 16-18.
- [14] Huang B S, Li G Y. Statistical methods of reliability assessment of cold stand-by systems. *Systems Science & Mathematics*, 2005, 25(2): 204-215. (in Chinese)
黄宝胜, 李国英. 冷备系统可靠性评定的统计方法. *系统科学与数学*, 2005, 25(2): 204-215.
- [15] Cao J H, Cheng K. Introduction to reliability math. Beijing: Higher Education Press, 2006: 15-16. (in Chinese)
曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论. 北京: 高等教育出版社, 2006: 15-16.
- [16] Crocker J, Kumar U D. Age-related maintenance versus reliability centred maintenance: a case study on aero-engines. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, 67(2): 113-118.

作者简介:

孙华荣 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 航空装备可靠性维修性工程。

Tel: 010-66713319

E-mail: gy741223@hotmail.com

王礼沅 男, 博士, 工程师。主要研究方向: 飞机总体设计与综合论证, 航空装备综合保障。

Tel: 010-66713989

E-mail: wangly1223@sohu.com

Research on Maintenance-free Operating Periods Decomposition Approach for Military Aircraft

SUN Huarong, WANG Liyuan^{*}, SUN Jiao, YU Jianfei

Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China

Abstract: In order to decompose maintenance-free operating periods (MFOP) parameters and realize them in the development of military aircraft, the factors for MFOP implementation, such as basic reliability, fault prediction, system reconfiguration and redundancy design, are mathematically modeled. An MFOP decomposition approach is proposed which can provide a basis for MFOP decomposition from utility parameters to contract parameters, and serve as theoretical guidance for MFOP index analysis and aircraft reliability design.

Key words: reliability; maintenance-free operating periods; military aircraft; mathematic modeling; decomposition approach

Received: 2011-04-13; Revised: 2011-05-30; Accepted: 2011-07-18; Published online: 2011-08-31 13:20

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110831.1320.002.html DOI:CNKI:11-1929/V.20110831.1320.002

^{*} Corresponding author. Tel.: 010-66713989 E-mail: wangly1223@sohu.com