

基于 PHM 的航空装备可用度影响因素分析方法

刘 瑞 马 麟 康 锐 邹莹芝

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院,北京 100191) (北京强度环境研究所,北京 100076)

摘 要: 对已有的航空装备可用度分析方法进行了综述,将航空装备可用度影响因素分为三类.通过 PHM(Prognostics and Health Management) 技术对航空装备保障过程的影响分析,梳理了基于 PHM 的航空装备可用度影响因素,并将这些因素按照其来源分为使用影响因素和设计影响因素两大类.给出了 4 个合理的仿真假设条件以简化仿真过程,并进一步将设计影响因素分为 5 种,并结合一个实例给出了基于 PHM 的航空装备可用度影响因素仿真过程中的输入.提出给定装备系统及其保障系统参数条件下的稳态可用度为仿真的输出,并给出与仿真输入相符的解析计算公式.详细描述了仿真程序的构成及其流程图.最后,以图形的方式给出了仿真结果.给出了案例的单因素分析及多因素耦合分析的过程及结论,验证了所提出的分析方法的可行性.

关 键 词: 可用度分析; 预测与健康管理; 仿真方法; 航空装备; 影响因素分析

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号:** 1001-5965(2011) 10-1238-07

Analysis method for influential factors of aviation equipment availability based prognostics and health management

Liu Rui Ma Lin Kang Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zou Yingzhi

(Beijing Institute of Strength and Environment, Beijing 100076, China)

Abstract: The aviation equipment availability analysis method was reviewed and the influential factors of aviation equipment availability were classified as three categories. The newly increased influential factors of aviation equipment availability were analyzed through analyzing in the influence of prognostics and health management (PHM) technology to the availability. These factors were specified in term of the sources as two categories: the operate factors and the design factors. Four reasonable assumptions to simplify the simulation process, were provided. Furthermore, the design factors were divided into five categories. Combined with an example, the definitions of the simulation inputs of aviation equipment availability were given with the values of them. And the output of the simulation process is the steady-state availability under given conditions. Simultaneously, the analytical algorithm of it is pressed. Then the compositions simulation program and its flow chart were detailed described. The simulation results of the example were given by graph. At the same time the processes and conclusions of univariate analysis and multi-coupling analysis were given to verify the feasibility of the analysis mentioned.

Key words: availability analysis; prognostics and health management (PHM); simulation method; aviation equipment; influential factors analysis

收稿日期: 2010-06-18; 网络出版时间: 2011-10-20 11:26; DOI: CNKI: 11-2625/V. 20111020. 1126. 003

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111020.1126.003.html>

作者简介: 刘 瑞(1983 -),男,青海互助人,博士生, kahniu@ase.buaa.edu.cn.

装备的可用性是装备可靠性、测试性、维修性和保障性等设计特性的综合表征,也是装备使用部门所关心的重要的装备使用参数。装备可用性所描述的是装备在规定的时间内、规定的条件下以及具有规定的资源时能够开始执行任务的能力^[1-2]。可用性常用可用度来度量,可用度是武器装备作战效能评价的重要指标,已被广泛运用于各种装备中^[3-10]。

目前在装备研制阶段,主要利用概率模型对可用度进行建模和分析,即从系统结构、部件的寿命分布、修理时间分布等有关信息出发,来推断出与系统寿命相关的可靠性指标,并根据想定的装备使用条件,来推断装备在给定的使用环境中的可用度指标^[11-13]。

装备的可用度不仅与装备本身有关,还与装备的使用环境、使用方法(任务)、装备保障系统运转情况等有关。所以在装备研制阶段仅靠概率模型无法很好地综合考虑装备使用过程中各种因素对装备可用度带来的影响。国内外对装备使用过程中可用度仿真进行了大量的研究。文献[14]给出了军用飞机使用可用度仿真的概率模型,文献[15]对装备使用过程维修时间的约束做了分析并给出了在维修时间约束条件下装备群可用度仿真的方法,文献[16]对不满足 Markov 过程的高可靠系统稳态使用可用度的快速仿真方法进行了研究并给出了仿真算法,文献[17]利用有色随机 Petri 网络的方法对某型航天设备使用可用度进行了仿真方法研究,文献[18]通过离散事件仿真算法对装备的使用可用度进行仿真研究并给出了以此提高产品可靠性和维修性的方法。

但是,大多数文献仅仅将装备可用度影响因素作为仿真的给定输入条件,并没有对装备可用度影响因素进行深入的分析。特别是在故障预测与健康诊断(PHM, Prognostics and Health Management)技术广泛应用于现有装备中后,对装备可用性的影响因素构成将可能会发生显著的变化。而这些影响因素对装备使用过程中的可用度的影响程度是不同的。在装备的研制过程中,如何能确定影响因素对装备使用可用度的影响的程度,对权衡优化装备及其保障系统的设计过程中寻求最优解有重要意义。

1 航空装备可用度影响因素分析

航空装备的可用度受多个因素的影响,主要包括 3 大类^[1,19]:

1) 装备系统的构成及其可靠性、维修性参

数,包括装备系统的构成方式、组成装备系统的各单元的可靠性参数、装备各组成部分的维修性等;

2) 保障系统的属性,包括装备各组成部分的实际修理时间、保障延误时间、保障资源的满足率等;

3) 装备系统所执行的任务信息,包括任务的持续时间、装备系统的任务强度、单次任务的执行时间等。

工程应用及分析表明^[20-22],采用 PHM 技术之后,可以减少装备停机时间,提高装备的使用可用度,从而提高了装备的战备完好率。国内外对 PHM 技术在航空装备中的应用开展了广泛的研究。文献[23]通过对 PHM 技术的分析,给出了利用高可靠的 PHM 系统进行喷气式发动机中各功能组件剩余寿命预测的方法,并提出利用喷气式引擎中组件的剩余寿命预测结果可以用来进行维修工作的规划。文献[24]认为,通过利用产品故障模式、影响与危害性分析(FMECA, Failure Modes, Effect and Criticality Analysis)的数据,提高产品剩余寿命预测的准确度,从而可以降低产品在任务过程中发生故障的可能性并减少产品寿命周期费用。文献[25]将 PHM 作为确定通用电气航空装备维修时机权衡的输入,以此安排对产品的维修,并建立了 PHM 条件下的基于状态维修(CBM, Condition Based Maintenance)权衡的框架结构。

1) 采用 PHM 技术后,会在一定程度上改变现有航空装备的保障流程及保障工作的内容,所以也会对航空装备可用度影响因素的构成造成一定的影响。

采用 PHM 技术后,由于是基于航空装备当前的状态来进行维修策略的决策,装备维修的触发方式、维修过程、维修时间构成均会发生变化。一方面,当装备需要维修时才会进行维修工作,所以大量的预防性维修工作将会被取消,减少了装备的停机时间。另一方面,机载 PHM 系统将潜在的故障隔离至分系统或外场可更换单元(LRU, Line Replacement Unite),减少了修复性维修中的故障隔离时间。

2) 在理想状态下,采用 PHM 技术将会避免产品在任务过程中发生随机故障,并可以在故障发生之前通知保障组织进行保障资源的准备,这样就能极大地缩短保障延误时间,减少装备维修停机时间,提高装备的可用度。

3) 在实际情况下,PHM 进行预测的准确度无法达到 100%,有可能存在误报、漏报的情况。

如果产生漏报,将导致装备在使用过程中发生随机故障.如果误报,则会导致装备不必要的停机检查,增加装备的维修时间从而降低装备的可用度.

2 构建影响因素仿真模型

建立影响因素仿真的目的在于:通过在给定的任务和使用环境下对基本作战单元在任务持续期间的仿真,来获取各种影响因素输入条件下航空装备的稳态可用度,并利用可用度的仿真结果进行影响因素的分析,从而得到各影响因素对航空装备可用度影响程度大小的排序,进而支持装备研制过程中装备及其保障系统的设计权衡分析.

2.1 仿真的假设

为了便于简化具有 PHM 功能的维修保障系统过程的仿真,需要做如下的假设:

- 1) 保障组织 24 h 处于可工作状态,且保障资源充足.当保障资源(包括备件)准备好时,即刻开展对装备故障的维修.
- 2) 保障组织的管理和运作中的复杂情况都被忽略,即保障资源的准备时间、后勤延误时间均为给定的一组常数.
- 3) 装备各个功能组件相互独立,即不会发生关联故障,但各个功能组件可能同时发生故障.
- 4) 为了方便比较因素影响程度的大小,PHM 系统故障预测准确率为给定一组常数.发现潜在故障的时间作为独立因素处理,也为给定的一组常数.

2.2 仿真模型的输入

仿真模型的输入由航空装备可用度影响因素决定.在装备的研制阶段,可用度影响因素可以分为使用影响因素因素和设计影响因素两类.

1) 使用影响因素.使用影响因素主要指在航空装备使用过程中产生影响的因素,这类因素在航空装备设计阶段是作为设计的输入而在设计阶段不可控,所以在本文所描述的仿真方法中,此类作为仿真的固定输入,而不对其进行分析.

假设某基本作战单元拥有某型飞机 24 架,每架飞机拥有 LRU 10 个.任务持续 100 天,在任务持续时间内每架飞机一直处于执行任务的状态,当且仅当飞机需要进行维修工作时(包括对潜在故障的维修或对随机故障的紧急维修)才停止任务进入维修状态.一旦飞机完成维修立即进入执行任务状态.

2) 设计影响因素.设计影响因素是指那些在航空装备及其保障系统设计阶段可以被控制或设

计的因素.基于 PHM 的航空装备可用度的可控影响因素主要包括:

- ① 模块的可靠性(module reliability).各个功能模块的可靠性用 MTBF (Mean Time Between Failures) 来度量,则第 k 架飞机中第 i 个 LRU 的可靠性可表达为 $T_{MTBFi}^{(k)}$.在仿真过程中,不同飞机中的相同功能模块的可靠性服从同一指数分布.
- ② 故障诊断时机(detection lead time).故障诊断时机是指当模块潜在故障被机载 PHM 系统检测出来时,模块的剩余寿命,可以表达为 T_{BF} .在实际使用过程中,这个因素与 PHM 系统预测准确率是一对矛盾的因素.
- ③ PHM 系统预测准确率(prognostic accuracy).当功能模块存在潜在的故障时,机载 PHM 系统能进行准确的故障检测、隔离及定位的概率,可表达为 r_{PA} .
- ④ 故障修复时间(maintenance time).故障修复时间主要指对故障 LRU 进行拆卸、更换操作的时间,而不包括故障隔离、资源等待的时间.假设仿真过程中所有模块的修复时间相同,则故障模块的修复时间可以表达为 t_m .
- ⑤ 保障资源准备时间(resources preparation time).当发生随机故障时需要修复性维修时,需要考虑保障资源的准备.保障资源准备时间可以表达为 t_{rp} .

这些影响因素在案例中的具体取值见表 1.

表 1 仿真的输入

因素名称	取值
模块可靠性 $T_{MTBFi}^{(k)}$ /h	100 200 300 <u>400</u> 500 600 700 800 900
故障诊断时机 T_{BF} /h	10 20 30 40 <u>50</u> 60 70 80 90 100
预测准确率 r_{PA}	0.6 0.65 0.7 <u>0.75</u> 0.8 0.85 0.9 0.95 1.0
故障修复时间 t_m /h	2 2.5 3 3.5 <u>4</u> 4.5 5 5.5 6 6.5 7
资源准备时间 t_{rp} /h	0.0 0.5 1 1.5 <u>2</u> 2.5 3 3.5 4 4.5 5

注:有下划线的数据为仿真基准数据组.

2.3 仿真模型的输出

在理想的情况下,装备的不能工作时间仅与装备自身的状态有关,绝大多数的预防性维修工作均可以取消.同时由于能够对装备状态做出准确的监测和预计,并在装备需要维护前进行保障资源的调配,则装备保障中的后勤延误时间的理论值可以近似为零.所以在传统定义中的固有可用度、可达可用度和使用可用度可以统一.仿真模

型的输出是装备在给定的任务条件下, 给定装备系统和装备保障系统的参数下的稳态可用度 A 。

稳态可用度 A 与装备在任务持续时间中的工作时间和不能工作时间有关, 可表达为

$$A = \frac{T_U}{T_U + T_D} \tag{1}$$

式中 A 为装备的稳态可用度; T_U 为装备在任务中的使用时间; T_D 是装备在任务持续过程中停机时间。其中 T_D 可以按式 (2) 得出:

$$T_D = \left(\frac{T_{MD} \times 24 \times N_{OU} \times n}{\Delta} \right) \times \lambda(t) \times [t_m + (1 - r_{PA}) \times t_{tp}] \tag{2}$$

式中 T_{MD} 为给定任务持续时间, 天; N_{OU} 为基本作战单元中装备的数量; n 为装备中 LRU 的个数; $\lambda(t)$ 为 LRU 的故障率。在仿真中当 PHM 预测出某 LRU 将发生与 T_{BF} 之后发生故障, 则假设期间 LRU 不会发生随机故障, 直至 LRU 得到更换并修复或到达 T_{BF} 时刻。所以式 (2) 中 Δ 为修正因子。

2.4 仿真模型的构成及仿真流程

仿真程序一共有 4 个模块构成, 分别完成如下功能:

1) 参数输入模块。完成从数据文件中读入仿真参数, 并将数据存入内存。

2) 过程数据存储模块。完成仿真时中间数据的存放, 便于后续计算。需要存储的数据有: 装备的状态(包括: 正常、停机维修中及等待)、装备中 LRU 的状态(包括: 工作、非工作、发现潜在故障及维修)、当前仿真停机总时长等。

3) 数据处理模块。完成对仿真中产生的大量中间数据进行处理, 并计算得出每个仿真采样点的可用度。

4) 结果输出模块。完成仿真结果的输出。

仿真流程如图 1 所示。

① 读入仿真参数, 包括表 1 中的数据及给定的任务数据。

② 确定仿真采样周期。任务持续 100 天, 采样间隔时间为 1 h。

③ 判断当前装备状态。 $t_{rm}^{(i,j)}$ 表示第 i 架飞机中第 j 个 LRU 的维修时间, 当 $t_{rm}^{(i,j)} = 0$ 时表明该 LRU 未处于维修状态, 当 $t_{rm}^{(i,j)} > 0$ 时说明该 LRU 处于维修状态且其值代表维修工作剩余时间。所以当

$$\sum_{j=1}^{100} t_{rm}^{(i,j)} > 0 \tag{3}$$

时, 说明第 i 架飞机处于停机维修状态。

④ 判断当前 LRU 状态。若当前采样飞机处

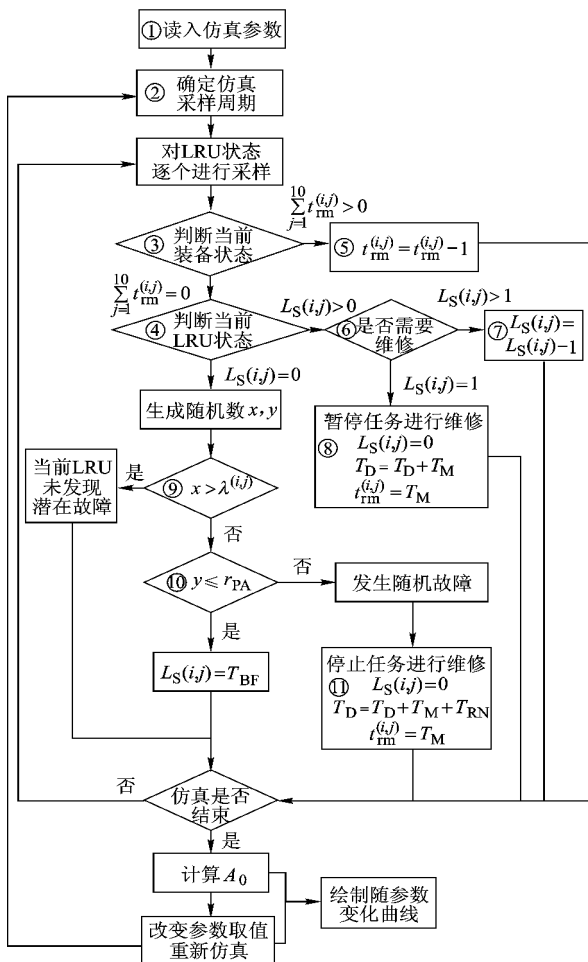


图 1 仿真流程

于工作状态, 则开始判断当前 LRU 的工作状态。 $L_S(i,j)$ 表示第 i 架飞机中第 j 个 LRU 的状态。 $L_S(i,j) = 0$ 表示该 LRU 工作正常且未发现潜在故障; $L_S(i,j) > 0$ 表示该 LRU 已发现潜在故障且其值表示故障预计的发生剩余时间。

⑤ 本次采样后, 当前 LRU 维修剩余时间减 1。

⑥ 判断当前 LRU 是否需要维修。 $L_S(i,j) = 1$ 表明当前 LRU 潜在故障即将发生, 将进行更换维修。 $L_S(i,j) > 1$ 则说明当前 LRU 不需要维修。

⑦ 当 $L_S(i,j) > 1$, LRU 潜在预计发生时间减 1。

⑧ 当 $L_S(i,j) = 1$, 装备停止任务并进入维修状态($t_{rm}^{(i,j)} = T_M$), 当前 LRU 状态恢复至正常状态($L_S(i,j) = 0$), 并记录本次维修时长($T_D = T_D + T_M$)。由于该 LRU 潜在故障已被 PHM 系统预测出, 所以不需要记录保障资源准备时间。

⑨ 判断当前采样 LRU 是否存在潜在故障。如果 $x > \lambda^{(i,j)}$ 则说明当前 LRU 未检测出潜在故

障. 反之, 则说明当前 LRU 存在潜在故障或在此时发生随机故障, 需要做进一步的仿真判断.

⑩ 判断 PHM 系统是否预测出此次潜在故障. 当 $y \leq r_{PA}$ 表示 PHM 准确预测出当前 LRU 将发生潜在故障. 且 $L_S(i, j) = T_{BF}$ 表示当前 LRU 将在 T_{BF} 发生潜在故障.

⑪ 当 $y > r_{PA}$ 时, 表示当前 LRU 发生故障且 PHM 系统未能提前预测本次故障. 当前 LRU 所属飞机将停止执行任务, 并进入维修状态. 此次故障停机时间累计为 $T_D = T_D + T_M + T_{RN}$, T_{RN} 为保障资源准备时间.

3 仿真结果及分析

3.1 单变量仿真结果

在仿真过程中, 在给定的参数基线下改变单个因素的取值来得到单一因素对装备可用度的影响变化曲线. 通过对比给定任务模型情况下, 航空装备可用度对每个独立因素变化的敏感程度, 从而可以确定影响航空装备可用度的主要因素. 仿真重复 100 次, 取平均值, 仿真结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看出 5 个变量对给定任务情况下, 基本作战单元可用度的增益或减益影响. 其中, 当且仅当装备的可靠性提高时, 虽然增长比较平缓, 但 A_0 仍有可能趋近于 1. 所以装备的可靠性 MTBF 是影响基本作战单元可用度的主要因素之一. PHM 系统预测的准确度和预测提前时间为一对矛盾的因素, 所以本文选取 PHM 系统预测准确度 r_{PA} 作为进一步对比的主要因素之一.

同时可以看出装备故障后修复性维修时间 t_m 对基本作战单元可用度有很强的减益作用, 但是在装备可靠性给定的情况下, 提高装备维修性并减小 t_m 对基本作战单元可用度提升的作用是有限的. 而在给定的情况下, 相对于其他 4 个参数, 缩短保障系统中保障资源准备时间并不能有效地提升基本作战单元使用可用度.

3.2 多变量耦合影响仿真结果

通过单变量敏感度仿真分析, 确定了在文章给定条件的情况下, 装备可靠性指标 MTBF, PHM 系统预测准确度 r_{PA} 和装备修复性维修时间 t_m 为影响基本作战的单元可用度的主要因素. 通过多变量耦合影响仿真, 两两对比上面提出的主要因素, 可以确定影响因素之间的关系, 进一步确定各主要影响因素的敏感度程度的大小.

1) MTBF 与 r_{PA} 对比. MTBF 与 r_{PA} 耦合仿真结果如图 3 所示. 由图 3 可见, 在本文给定的情况下, 装备可靠性较低时, 单纯地提高 PHM 系统预

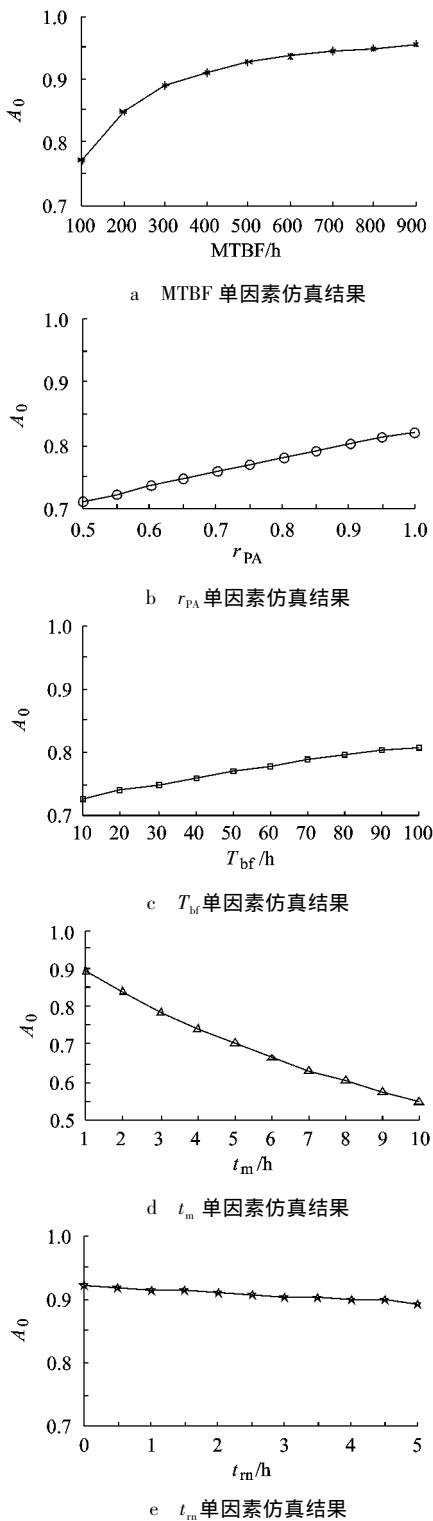


图 2 单因素仿真结果

测准确度无法将使用可用度提高到可接受的水平. 但是当装备的可靠性水平较低时, 提高 PHM 系统预测准确度可以快速提高装备在给定任务情况下的可用度. 而增加装备的可靠性可以快速提升给定任务条件下装备的可用度, 并且这一增益过程将在 MTBF 增长为 400 h 时呈现边际效应.

2) MTBF 与 t_m 对比. MTBF 与 t_m 耦合仿真结果如图 4 所示.

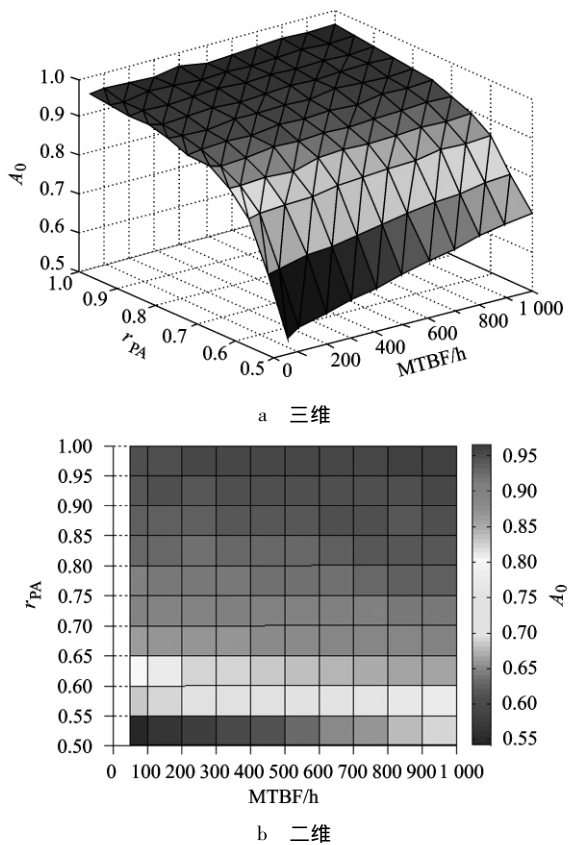


图 3 MTBF 与 r_{PA} 双因素仿真结果

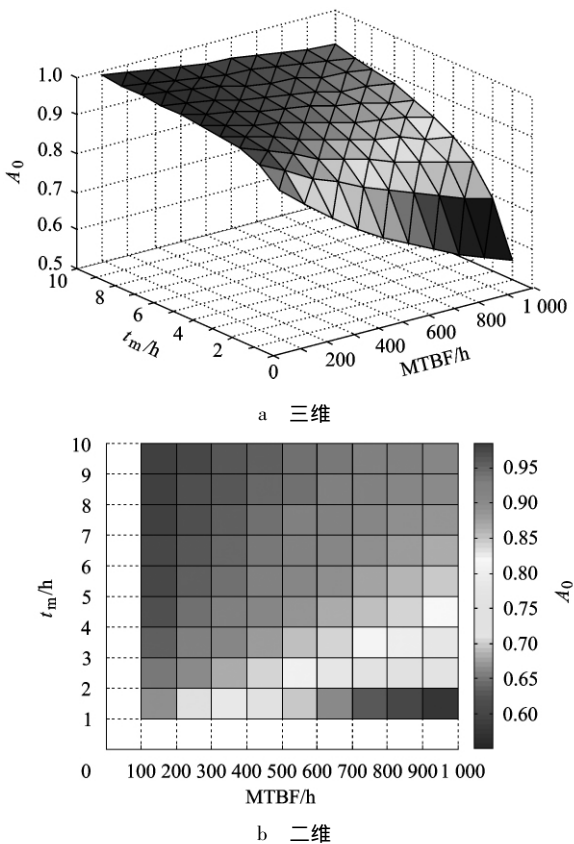


图 4 MTBF 与 t_m 双因素仿真结果

从图 4 中可以看出,当装备可靠性水平较低时,提高装备维修性或缩短保障系统中保障时间,

也可以使装备的可用度处于较高的水平.但装备自身的可靠性还是影响装备使用可用度的重要因素.特别是当装备维修性难以提高或现有保障系统效率较低时,可以通过提高装备自身的可靠性水平来确保装备的可用度水平.

4 结 论

本文提出的基于 PHM 的航空装备可用度影响因素仿真分析方法可以支持装备研制过程中装备及其保障系统的设计权衡分析.

- 1) 总结并分析了影响装备可用度的影响因素,结合 PHM 技术给出了基于 PHM 的航空装备可用度影响因素分类.
- 2) 给出了在现有技术条件下,PHM 技术中存在不确定性因素对装备可用度的影响.
- 3) 给出了航空装备可用度影响因素仿真分析方法,确定的仿真假设、输入、输出及仿真流程.
- 4) 通过实例验证,证实了本文提出的方法的可行性.

致谢 感谢黄兆东博士生在论文仿真程序设计过程中提出的建议,有效地提高了仿真的效率.

参考文献 (References)

[1] 杨为民. 可靠性维修性保障性总论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 20 - 22
Yang Weimin. Reliability, maintainability and supportability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 20 - 22 (in Chinese)

[2] Benjamin S Blanchard, Wolter K Fabrycky. System engineering and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 359 - 360

[3] Alexander H Levis, Paul K Houpt, Stamatis K Andreadakis. Effectiveness analysis of automotive systems [C]//1985 American Control Conference. Boston: American Automatic Control Council, 1985: 1432 - 1437

[4] 高尚, 娄寿春. 武器系统效能评定方法综述 [J]. 系统工程理论与实践, 1998 (7): 109 - 114
Gao Shang, Lou Shouchun. Progress in assessing the effectiveness of weapon system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998 (7): 109 - 144 (in Chinese)

[5] 谈斌, 周海云, 张己化. 基于 HLA 的装备作战效能评估仿真框架研究 [J]. 计算机仿真, 2008, 25 (5): 11 - 14
Tan Bin, Zhou Haiyun, Zhang Jihua. A weapon equipment simulation framework for efficiency evaluation based on HLA [J]. Computer Simulation, 2008, 25 (5): 11 - 14 (in Chinese)

[6] 王正元, 刘靖旭, 谭跃进, 等. 基于作战仿真的装甲车辆作战效能评估方法 [J]. 国防科学技术大学学报, 2004, 26 (2): 106 - 109
Wang Zhengyuan, Liu Jingxu, Tan Yuejin, et al. Combat effec-

- tiveness evaluation of the armored vehicle based on combat simulation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(2): 106–109 (in Chinese)
- [7] Fashandi A. System availability and operation support modeling [C]//The 28th International Electronics Manufacturing Technology Symposium. California: IEEE Press, 2003: 347–350
- [8] 汪民乐, 高晓光, 蔡付东. 作战飞机效能分析研究综述 [J]. 飞行力学, 2001, 19(4): 1–5
Wang Minle, Gao Xiaoguang, Cai Fudong. Overview of research on military aircraft combat effectiveness analysis [J]. Flight Dynamics, 2001, 19(4): 1–5 (in Chinese)
- [9] 贾跃, 宋保维, 梁庆卫. 鱼雷武器系统效能评估模型及其仿真 [J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 475–479
Jia Yue, Song Baowei, Liangqingwei. Mathematical model and simulation of torpedo weapon system effectiveness evaluation [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(3): 475–479 (in Chinese)
- [10] 于小红, 蔡远文, 杨仁保. 运载火箭发射过程效能评估方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2005(3): 19–22
Yu Xiaohong, Cai Yuanwen, Yang Renbao. Research on effectiveness evaluation for launch process [J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(3): 19–22 (in Chinese)
- [11] Kirmani E, Hood C S. A new approach to analysis of interval availability [C]//The 3rd International Conference on Availability, Reliability and Security. California: IEEE Computer Society, 2008: 479–483
- [12] 王立超. 系统可用度匹配分析与设计 [D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2008
Wang Lichao. The analysis and design of the matchingization for system availability [D]. Nanjing: School of Automatic, Nanjing University of Science & Technology, 2008 (in Chinese)
- [13] Zheng Z H, Cui L R, Hawkes A G. A study on a single-unit Marko repairable system with repair time omission [J]. IEEE Transaction on Reliability, 2006, 55(5): 182–188
- [14] 赵冰化, 王勇. 军用飞机可用度概率模型及仿真 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(6): 80–83
Zhao Binghua, Wang Yong. A research on conceptual model and simulation for the military aircraft availability [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(6): 80–83 (in Chinese)
- [15] 高文, 祝明发, 徐志伟. 基于维修时间约束的机群系统可用度的仿真算法 [J]. 计算机学报, 2001, 24(8): 876–880
Gao Wen, Zhu Mingfa, Xu Zhiwei. A simulation algorithm of cluster system's availability within repair time constraints [J]. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(8): 876–880 (in Chinese)
- [16] Nicola V F, Shahabuddin P, Heidelberger P, et al. Fast simulation of steady-state availability in non-Markovian highly dependable systems [C]//The 23rd International Symposium on Fault-Tolerant Computing. France: IEEE Computer Society, 1993: 38–47
- [17] Nebel S, Bertsche B. Modeling and simulation methodology of the operational availability and logistics using extended colored stochastic petri nets: an astronautics case study [C]//2008 Reliability and Maintainability Symposium. Nevada: IEEE Press, 2008: 434–439
- [18] Bazargan M, McGrath R N. Discrete event simulation to improve aircraft availability and maintainability [C]//2003 Reliability and Maintainability Symposium. Florida: IEEE, 2003: 63–67
- [19] 冯旭中, 张振友. 基于任务的复杂武器系统可用性仿真研究 [J]. 兵工自动化, 2009, 28(2): 71–73
Feng Xuzhong, Zhang Zhenyou. Availability simulation on complex weapon systems based on mission [J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(2): 71–73 (in Chinese)
- [20] 曾声奎, Michael G. Pecht, 吴际. 故障预测与健康管理技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626–632
Zen Shengkui, Michael G. Pecht, Wu Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626–632 (in Chinese)
- [21] John W Sheppard, Mark A Kaufman, Timothy J Wilmering. IEEE standards for prognostics and health management [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 24(9): 34–41
- [22] Fatih Camci. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(3): 539–552
- [23] Eva L Suarez, Michael J Duffy, Robert N Gamache, et al. Jet engine life prediction system integrated with prognostics and health management [C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana: AIAA, 2004: 3596–3602
- [24] Todd D Batzel, David C Swanson. Prognostics and health management of aircraft power generators [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2009, 24(2): 473–483
- [25] Jon Dunsdon, Mark Harrington. The application of open system architecture for condition based maintenance to complete IVHM [C]//2008 IEEE Aerospace Conference. Montana: AIAA, 2008: 1–9

(编辑: 姜 嘉)