

基于状态监测的岸防武器系统保障性 评估指标研究

孟祥辉, 熊 尚

(中国人民解放军 92228 部队, 北京 102442)

摘要: 目前岸防武器系统保障特性评估还存在诸多空白, 为客观、准确地评估装备保障特性, 及时掌握装备技术, 适时开展装备保障, 快速形成保障能力, 通过建立保障特性评价指标体系, 对特征属性与观测指标开展状态监测, 形成保障特性评估的方法; 利用状态监测技术精确获悉目标对象的技术状态, 快速准确响应各类保障需求, 可适时主动优化装备性能, 充分发挥岸防武器系统的作战效能, 为科学、准确地评估装备保障特性提供理论与方法支撑; 为实现由事后维修和预防性维修向基于状态的修理模式转变奠定基础。

关键词: 保障特性; 状态监测; 岸防武器

Research on Evaluation System of Shore Defense Weapon System Supportability Based on Condition Monitoring

Meng Xianghui, Xiong Shang

(92228 Unit of the PLA, Beijing 102442, China)

Abstract: At present, there are many gaps in the supportability evaluating of the shore defense weapon system. Aiming at how to objectively and accurately evaluate the characteristics of equipment supportability, grasp the equipment technology in time, and timely develop equipment support and quickly from the support capability. A method for evaluating supportability by using state monitoring technology is proposed. Using state monitoring technology to acquire and grasp the technical state of target objects, respond to various security needs quickly and accurately. Timely and actively optimize the equipment performance, give full play to the operational effectiveness of the shore defense weapon system, and provide theoretical and method for the scientific and accurate evaluation of the equipment supportability. Lay the foundation for the transformation of post based maintenance and preventive maintenance to state based repair mode.

Keywords: supportability; state monitoring; shore defense equipment

0 引言

状态监测与保障特性评估技术作为实现基于状态维修的关键技术, 是一项战略性的装备保障策略^[1], 其目的是对装备状态进行实时或周期性的监控和评估, 根据装备的实际状态确定性能衰退趋势、最佳维修时机和保障决策方案, 以提高装备的可用度和任务可靠性。随着作战理念和作战样式的演变以及装备复杂性、信息化和综合化程度的提高, 装备维修保障工作重点已由传统的以事后修复为主, 逐步转变为以信息的获取、处理和传输并做出维修决策为主。以往的事后维修和定期维修已经无法很好地满足现代战争和武器装备对装备保障的要求, 因此, 基于状态的维修(Condition Based Maintenance, CBM)和预测与健康管理(PHM)理念逐渐兴起^[2]。

目前, 国内已经开始向系统级故障预测与健康管理工作^[3], 逐步扩展到更多的机电和电子系统。在新型传感原

理、微弱特征提取与早期故障检测技术、自学习监控与诊断技术、故障预测方法算法、PHM系统集成技术等方面取得一些创新。领域从军机扩展到了民机、舰船等, 并形成了一些工程实用化系统。虽然国内 PHM 发展已取得一些成绩, 但综合各方面情况看, 技术基础薄弱, 研究对象覆盖面较窄, 与国外相比存在较大的差距。

状态监测与评估已成为国外新一代武器装备研制和实现“感知与响应”保障的一项核心技术, 是提高复杂系统可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性和环境适应性和降低寿命周期费用的关键技术。我军在状态监测与评估应用领域方面的研究起步较晚, 装备的相关研究现在仍处于探索阶段。因此, 积极借鉴外军关于 CBM 的发展成果, 开展状态监测和保障特性评估技术与体系构建研究, 对提高岸防装备平时战备完好性和战时持续保障能力, 提升岸防装备通用质量水平和体系保障能力具有重要的意义。

1 保障特性评价指标体系

以科学构建保障特性评估指标体系和提升岸防武器系统技术状态水平为目标, 分析装备保障特性信息对装备保障功能特性、保障系统资源属性的影响; 在此基础上, 分

收稿日期:2019-10-09; 修回日期:2019-10-28。

作者简介:孟祥辉(1979-),男,河南新乡人,博士,高级工程师,主要从事装备论证与综合保障方向的研究。

析确定岸防装备保障特性评价指标, 并通过分析保障特性评价指标体系之间的逻辑关系和重要性, 构建完备的保障特性评价指标体系。根据保障特性评价指标的信息采集难度、与其他特征指标的信息相关程度, 构建层次清晰、指标灵活可裁剪的保障特性评价指标体系。

1.1 保障特性评价指标体系构建

保障特性评价指标是通过分析装备使用和保障过程中的各类信息, 分析各类信息对装备保障特性的意义、价值和影响, 从而确定评价指标, 装备的信息性质分类主要分为设计属性、综合保障特性等, 不同性质属性有其对应的特征属性和观测值指标, 观测指标产生于装备寿命过程中的不同阶段, 由于信息采集难度的不同, 某些观测指标不合适进行量化, 对此类指标参数可以采用专家打分的方式进行量化, 也可以给出定性评语。特征属性与观测指标如图 1 所示。

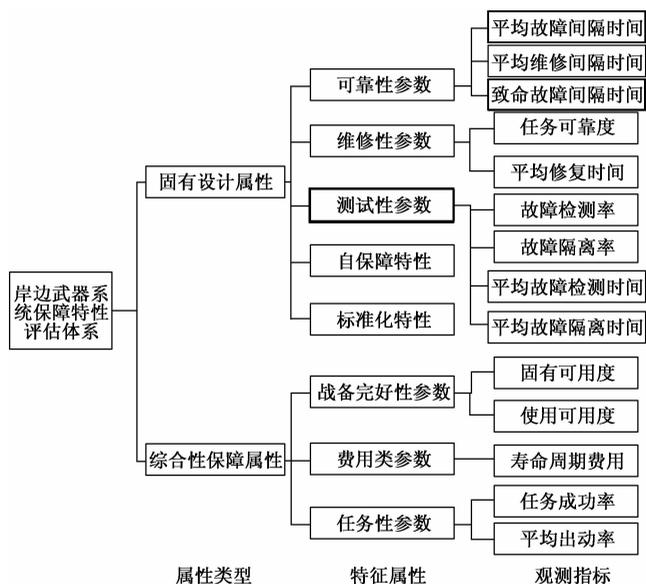


图 1 岸防武器系统保障特性评估指标体系

在确定底层观测指标的基础上, 通过参数格式统一和层次权重确定得到合理的装备保障特性评估指标体系^[4]。对于参数格式统一, 采用模糊理论对定性信息进行量化处理, 采用归一化算法来统一观测指标的尺度; 对于指标权重的优化, 采用成熟的主观与客观赋权相结合的赋权方法, 最终确定岸防武器装备保障特性指标。

1.2 保障特性指标影响分析

1.2.1 保障特性指标参数对装备保障功能特性的影响

装备处于完好状态, 不一定就能完成规定功能、执行相应的任务, 还需要一系列协调有效的使用保障工作。使用保障是为保证装备正确动用, 以便能充分发挥规定的作战性能所进行的一系列技术与管理工作。例如, 针对某型岸防武器系统的雷达车, 其规定的功能有机动和探测敌目标等, 但如果雷达车没有燃料, 即使其各部分均处于完好状态, 也无法完成机动任务; 再如, 针对远程轰炸机, 如果缺乏足够的油料、弹药, 其航程再大, 也无法完成远

程轰炸的作战任务。由此可见, 使用保障是装备战斗力不可分割的组成部分, 任何装备的战斗力都是在使用的过程中体现的。无论装备的战术技术性能如何先进, 一般都需要在得到有效的使用保障基础上才能充分发挥。

必须要在装备设计过程中, 从功能原理、结构方案等方面入手, 考虑如何方便、顺利地开展使用保障活动, 使得装备能够正常地行使其功能, 而这些在设计过程中形成的特性就是装备的使用保障性。使用保障性设计得好, 在操作动用装备执行任务时, 装备就易于获得及时、有效、经济的保障。以岸防武器装备为例, 其系统复杂, 对维护保障人员、资源等的要求较高, 其在寿命周期过程中发生故障并进行修复的消耗也较大, 其使用保障的显得尤为重要。

因此, 通过在岸防武器装备的保障功能方面, 增加状态监测、健康评估等功能, 提升使用保障特性, 可更好地发挥保障的作战效能。

1.2.2 保障特性指标参数对保障系统资源属性的影响

装备的维修保障特性与保障资源关系密切。如果装备的可靠性高, 则维修任务量少、维修保障资源需求也相应减少; 维修性好, 则装备的维修工作便于开展, 也同样会减少对维修保障资源的需求; 测试性好, 则对故障检测诊断设备的需求减少、大大缩短维修排查时间。掌握好装备的故障规律, 充分开展装备的保障特性信息分析和研究, 对于规划、设计保障系统, 对于确保装备的战备完好状态是至关重要的。

保障系统资源属性主要体现装备的维修保障特性。与使用保障特性不同的是, 维修保障特性主要针对的是装备“故障”引发的相应维修问题。虽然装备发生的故障与装备执行的任务、行使的功能有关, 但这种关系不是直接一一对应的。故障的发生有其随机性, 掌握装备故障规律是做好维修保障特性设计的基础。

维修保障特性的定义是: “在规定的条件下和规定的时间内, 装备能够保持或恢复到规定的战备完好状态的能力”^[5]。装备保持战备完好状态, 包含了两个方面的含义: 不出故障、出了故障后能够迅速排除而不影响任务的执行。前者对应着装备的可靠性, 而迅速排故则与装备维修性、测试性密切相关。因此, 装备的维修保障特性也由这三类特性所构成⁶⁻⁸。

因此, 如何找出装备的薄弱环节, 快速定位系统故障是研究的主要内容之一。通过开展在线状态监测技术研究, 即可有效支撑故障的在线实时判定。

2 保障特性综合评估与权衡

2.1 保障特性指标计算

保障特性评估, 首先需要实现对保障特性关键指标的获取和计算。对于测试性、维修性、战备完好性等各类指标的获取方式, 部分指标可通过在线状态监控获取, 而部分指标需通过装备保障特性信息的人工采集实现对保障特性指标的获取。

同时, 针对岸防武器系统其特殊的使用场景和使用条

件,亦需要综合选取合适的保障特性指标计算方法。例如,对于某武器装备,其保障特性的使用可用度 A_0 ,可采用以下算式计算:

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF - MTTR + ADT}$$

其中: $MTBF$ 为平均故障间隔时间, $MTTR$ 为平均修复时间, ADT 为后勤保障延误时间。同时,亦可采用以下计算公式:

$$A_0 = 1 - \frac{FH/day/MTTR + ADT}{24 \times MTBF}$$

因此,需要选取合适的指标特征计算方法,以构建更加能够表征装备保障特性的特征参数。

2.2 保障特性综合评估

通过对初拟的岸防武器系统装备保障特性综合评估指标体系进行筛选和分解,构建的岸防武器装备保障特性综合评估指标体系,拟采用模糊层次法实现对保障特性的综合评估计算。模糊层次分析法又称为不确定型层次分析法(FAHP),与确定型层次分析法(AHP)相对应。保障特性评估中保障性能的影响因素包括固有设计属性(如:测试性、可靠性评价指标等)以及综合性保障属性(如:战备完好性评价参数、费用类参数等)等多个因素,这造成专家在评估时会出现难以确定权重的困难,并且权重又因专家的学识和经验不同而给出不同的判断值,以上各方面的原因催生了模糊评估方法的发展。

模糊层次分析法首先把要解决的问题分解成多个因素,建立层次结构,再比较各因素间的相对重要性,通过判断矩阵(这里的判断矩阵因子是区间的形式)运算,解决子问题,最后做出最优决策。整个分析流程如图 2 所示。

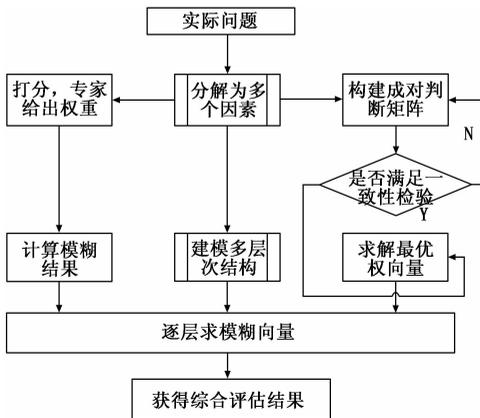


图 2 模糊层次分析法流程图

2.2.1 建立因素集

通常将实际问题分解为多个因素后,得到由这些子问题组成的因素集,根据因素集构建多层次结构——总目标层(一级)、指标层(二级)、子指标层(三级)、底指标层等多个层次。

2.2.2 构建成对判断矩阵

因素集的因子两两进行成对比较,得出因子判断区间,假定模糊判断矩阵为 A ,其因子 A_{ik} 为区间的形式 $A_{ik} = [a_{ik},$

$b_{ik}]$,且有:

1) $1/9 < a_{ik} < b_{ik} < 9$

2) $A_{ii} = [1, 1]$

3) $A_{ki} = [a_{ki}, b_{ki}] = [1/b_{ik}, 1/a_{ik}]$

模糊矩阵 A 的第一层因子采用 1~9 标度两两成对判断构造,从第二层开始运用成对判断构造外,还需满足 $A_{ii} = [1,1]$ 和 $A_{ki} = [1/b_{ik}, 1/a_{ik}]$;

其中: $\frac{A_i}{A_k} = 1$ 表示 A_i 和 A_k 同样重要; $\frac{A_i}{A_k} = 3$ 表示 A_i 比 A_k 稍重要; $\frac{A_i}{A_k} = 5$ 表示 A_i 比 A_k 重要; $\frac{A_i}{A_k} = 7$ 表示 A_i 比 A_k 更重要; $\frac{A_i}{A_k} = 9$ 表示 A_i 远远比 A_k 重要。

如 $\frac{A_i}{A_k}$ 分别为 1/3、1/5、1/7、1/9,所表达的含义则与上述含义正好相反。成对判断矩阵通常用 1~9 标度构造。构造的成对判断矩阵为正互反矩阵,但不是一致阵,所以还需进行一致性检验。

2.2.3 最优权向量求解

不确定型判断矩阵中各指标的权重区间通过一致性检验后,权重向量可采用线性目标规划法、特征根法等计算得到。但是,基于上述得到的权重向量为区间值,只可用于解决多准则决策问题,而非最优权向量,不能用于综合评估保障特性,因此需要进一步确定最优权向量。依据区间判断矩阵组成本义,专家给出的权重隐含于区间判断矩阵中,且权向量和为 1,当原区间矩阵 A 与权向量构成的判断矩阵 W 差的平方和相离度最小时,该隐含权向量即是最优权向量^[9]。

2.2.4 计算模糊结果

根据各因素的评分和规定的隶属函数计算得出模糊向量。这里采用梯形隶属函数确定各等级的隶属度,对于保障性能的等级隶属函数可由图 3 表示。

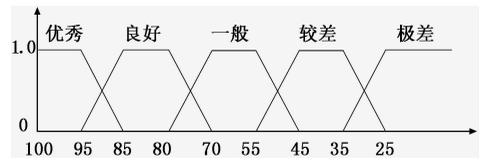


图 3 保障性能等级隶属函数

两类评分的交叉部分构成模糊区间,类的隶属度由其模糊区间所占比例的大小划分。将基于规则得到的检测数的评分值转化成模糊向量,用来进行模糊评估。假设评分是 78,那模糊向量即为 (0, 0.8, 0.2, 0, 0),如果评分为 80,则在隶属函数中居于二级区域(良好区域: 85~80),模糊向量是 (0, 1, 0, 0, 0),计算方法如下:

$$f(x) = \begin{cases} (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) = (78 - 70) / (80 - 70) = 0.8 \\ (x_{max} - x) / (x_{max} - x_{min}) = (80 - 78) / (80 - 70) = 0.2 \end{cases}$$

x_{max} 为模糊区间最大值, x_{min} 为模糊区间最小值, x 为检测评分。

2.2.5 得出综合评判

由最底层的模糊结果和最优权重(由模糊判断矩阵计算得出的权重和专家经验给出的权重)根据多层次结构逐层计算上一级的模糊结果,最终求得一级模糊结果,然后作出最后决策。得出综合评判的示意图如图 4 所示。

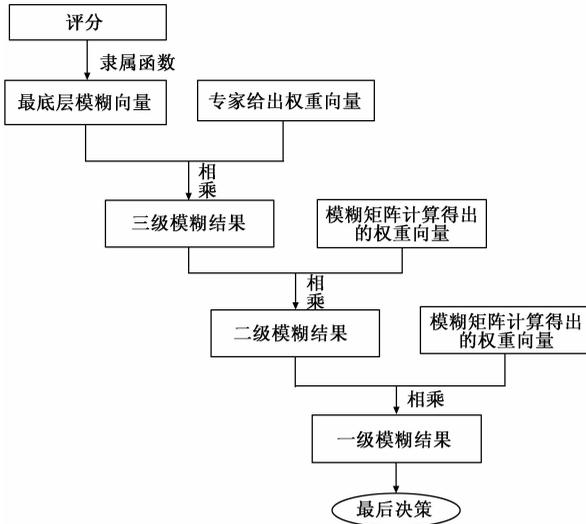


图 4 综合评判示意图

2.3 保障特性权衡分析

装备的测试性及维修性与战备的完好性等各类保障,其指标的权衡与分配是达到特定要求下保障性能最优的关键因素。一般地,装备综合保障的终极目标是在可承受的寿命周期费用内,实现武器装备的战备完好、保证任务成功,达到持续作战要求,从而满足武器装备平时与战时的使用要求。因此武器装备保障特性的评估指标需体现装备的战备完好、任务成功、持续作战和保障费用等情况^[10]。

通过对初拟的岸防武器系统装备保障特性综合评估指标体系进行筛选和分解,构建的岸防武器系统装备保障特性综合评估指标体系,分析评估指标与岸导武器系统综合保障目标之间的关系,构建从目标出发的装备评估指标与综合保障目标之间的关系模型,实现装备评估指标与综合保障特性平衡仿真分析工具,为装备综合保障特性计算、分配以

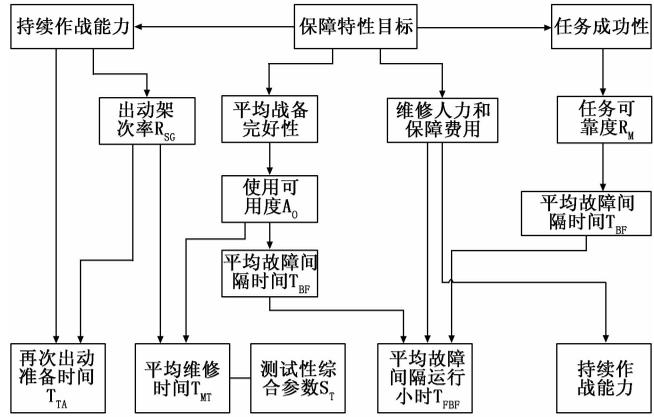


图 5 装备评估指标与综合保障目标之间的关系模型示意

及保障特性权衡提供建议。

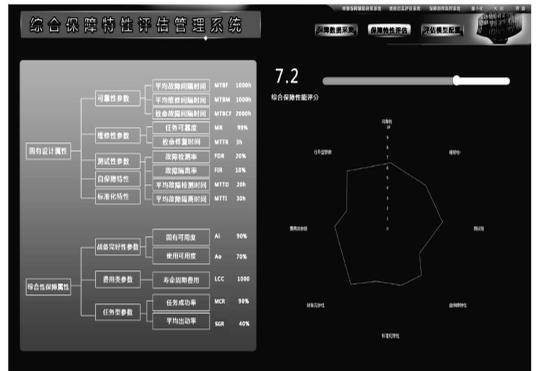


图 6 保障特性综合评估与权衡示意

利用权衡分析工具,以某岸防装备为例,开展保障特性评估与权衡分析验证。经过分析,该岸防装备其保障特性目标由持续作战能力、平均战备完好性、维修人力和保障费用、任务成功性等四个维度决定。持续作战能力又由再次出动准备时间 T_{TA} (由平均维修时间 T_{MT} 影响确定, T_{MT} 又由测试性综合参数 S_T 影响确定)、出动架次率 R_{SG} 共同决定(其又直接受再次出动准备时间 T_{TA} 影响);平均战备完好性由使用可用度 A_0 影响决定, A_0 又由平均维修时间 T_{MT} 、平均故障间隔时间 T_{BF} (受平均故障间隔运行小时 T_{FBF} 影响)

表 1 某型岸防装备保障特性评估与权衡结果指标项

序号	R_{SG}	T_{TA}	T_{MT}	A_0	T_{BF}	S_T	T_{FBF}	R_M	T_{BCF}	D_A	保障特性评分	权衡建议
1	0.88	0.86	0.89	0.89	0.88	0.89	0.88	0.85	0.82	0.86	8.7	$T_{TA} \downarrow$
2	0.80	0.78	0.82	0.83	0.84	0.82	0.84	0.82	0.81	0.83	8.2	$T_{TA} \downarrow$
3	0.77	0.75	0.78	0.78	0.77	0.78	0.77	0.76	0.76	0.77	7.7	$T_{TA} \downarrow$
4	0.91	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	9.1	$T_{FBF} \uparrow$
5	0.82	0.78	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.85	0.85	0.85	8.3	$T_{TA} \downarrow$
6	0.77	0.76	0.78	0.77	0.79	0.78	0.79	0.80	0.80	0.80	7.8	$T_{TA} \downarrow$
7	0.64	0.63	0.65	0.66	0.67	0.65	0.67	0.69	0.70	0.68	6.6	$T_{TA} \downarrow$
8	0.82	0.80	0.84	0.82	0.86	0.84	0.86	0.85	0.85	0.85	8.4	$T_{TA} \downarrow$
9	0.73	0.72	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75	0.75	0.76	7.4	$T_{TA} \downarrow T_{FBF} \uparrow$
10	0.76	0.71	0.80	0.81	0.79	0.80	0.79	0.78	0.77	0.78	7.8	$T_{TA} \downarrow T_{FBF} \uparrow$

注:以上指标均为归一化后结果;权衡建议中的“ \downarrow ”表示建议降低该指标数值,“ \uparrow ”表示建议对该指标进行提升。

共同影响决定；维修人力和保障费用由评估故障间隔运行小时 T_{FBF} 以及持续作战能力 D_A 等确定；任务成功率由任务可靠度 R_M 决定， R_M 由平均严重故障间隔时间 T_{BCF} 影响（其可由平均故障间隔运行小时 T_{FBF} ）。根据以上分析指标，对该系列 10 部岸防装备进行保障特性评估与权衡分析，其结果如表 1 所示，该保障特性评分基本可表征该型装备的保障特性，权衡建议与实际较为契合，初步验证了本文保障特性综合评估与权衡方法的可行性。

3 结论

针对岸防武器系统的保障特性，基于状态的评估体系可有效管理其全寿命周期的使用维修数据，全面监测、评估、诊断整个系统的健康状态，并且提供维修的策略及方法。改变评估模型及算法，本研究的成果能够广泛应用在其它海军武器系统的使用、贮存等多个环节的综合诊断及健康状态监测过程中，这对视情维修、精确保障具有重要的指导意义。

参考文献：

[1] 张宝珍. 预测与健康管理技术的发展及应用 [J]. 测控技术, (上接第 253 页)

[2] Smith A L. An integrated navigation system model for coupled GNSS— inertial navigation research [A]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference [C]. 2013.

[3] 蒋德杰. 基于惯性辅助卫星导航完好性监测研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2012.

[4] Umar I B, Washington Y O. Failure modes and models for integrated GPS/INS System [J]. The Journal of Navigation, 2007, 60: 327 - 348.

[5] RTCA SC-159. DO-208— Minimum operational performance standards for airborne supplemental navigation equipment using global positioning system [S]. Washington DC: RTCAInc, July 1991.

[6] Groves P D. GNSS 与惯导及多传感器组合导航系统原理（第二版）[M]. 练军想，唐康华，潘献飞，等译. 北京：国防工业出版社，2015.

[7] 赵思浩，陆明泉，冯振明. EKF 与 UKF 在紧耦合组合导航系统中的应用 [J]. 系统工程与电子技术，2009, 31 (10): 2450 - 2454.

[8] 基于 STK 模型的伪距/伪距率组合导航算法研究 [J]. 飞行设计，2015, 35 (6): 8 - 14.

[9] 李家森. 北斗/INS 组合导航信息融合滤波算法研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2013.

[10] 张光理. 北斗/SINS 组合导航系统研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2012.

[11] Bhatti U I. Improved integrity algorithms for integrated GPS/INS systems in the presence of slowly growing errors [D]. London: Imperial College London, 2007.

[12] Sarps I. Annex 10; International standards and recommended practices; aeronautical telecommunications, Volume I [S]. In-

2008, 27 (2): 5 - 7.

[2] Hees A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems [A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. Montana, Canada : IEEE Aerospace and Electronics System Society, 2002.

[3] 郭阳明，蔡小斌，张宝珍. 故障预测与健康状态管理技术综述 [J]. 计算机测量与控制，2008, 16 (9): 1213 - 1219.

[4] 肖波平，王 婷，王乃超，等. 装备使用保障性评价参数体系 [J]. 兵工自动化，2014, 33 (1): 39 - 42.

[5] 陈 玲，蔡 琦，蔡章生. 基于 Mamdani 模糊推理的核动力装置技术状态评估 [J]. 海军工程大学学报，2007, 19 (6): 65 - 72.

[6] 屈 岩，孟晓红，刘 鹏，等. 保障性分析在装备寿命周期过程中的应用 [J]. 四川兵工学报，2012, 33 (8): 52 - 54.

[7] 张 涛，张建军，郭 波，等. 装备使用阶段的维修保障能力评估指标体系研究 [J]. 装甲兵工程学院学报，2004.

[8] 施建荣. 舰船装备的可靠性研究 [J]. 上海造船，2004 (2).

[9] 张铁柱，等. 遗传算法在系统可靠性优化中的应用 [J]. 控制与决策，2002 (3): 378 - 380, 384.

[10] 徐宗昌. 保障性工程 [M]. 北京：兵器工业出版社，2002.

[11] International Civil Aviation Organization, 2006.

[13] Federal Aviation Administration. Airborne supplemental navigation equipment using the global positioning system (GPS), technical standard order (TS9) - C129A [S]. Washington DC: FAA Aircraft Certification Service, February 1996.

[14] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证 [D]. 武汉：武汉大学，2013.

[15] 宋美娟，唐荣龙. 北斗卫星导航系统完好性性能测试方法与分析 [J]. 北京测绘，2015 (1): 109 - 113.

[16] Langel S E, Khanafseh S M, Chan F C, et al. Integrity risk bounding in uncertain linear systems [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38 (10): 1990 - 1994.

[17] Langel S E, Khanafseh S M, Pervan B S. Bounding integrity risk for sequential state estimators with stochastic modeling uncertainty [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37 (1): 36 - 46.

[18] Jamoom M B, Joerger M, Pervan B. Unmanned aircraft system sense-and-avoid integrity and continuity Risk [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2016, 39 (3): 498 - 509.

[19] Vanderwerf K. FDE using multiple integrated GPS/Inertial Kalman filters in the presence of temporally and spatially correlated Ionospheric error [A]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [C]. Salt Lake City, UT; September 2001, 2676 - 2685.

[20] Blanch J, Walter T, Eenge P. Theoretical results on the optimal detection statistics for autonomous integrity monitoring [J]. Navigation Journal of the Institute of Navigation, 2017, 64 (1): 123 - 137.