

## 装备健康状态评估指标论证方法

杨 鹏\*, 张 勇, 邱 静, 刘冠军

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)指标是否科学将直接影响PHM的设计效果,进而影响装备的可用性。针对实践中缺乏理论性与可实现性强的PHM指标论证方法,提出从装备综合效能指标到PHM综合指标、再到PHM能力指标的分级论证方法。选取可用度作为装备综合效能指标,定义了健康状态评估率并将其作为PHM综合指标,推导出可用度与健康状态评估率的关系式,以可用度最大化为目标求解出健康状态评估率指标。证明了健康状态评估率等于故障覆盖率与评估准确度的乘积,二者分别取决于感知单元的数量和诊断预测方法的准确性,这对开展PHM设计有指导意义。通过案例检验了上述方法的有效性和实用性。

**关键词:** 预测与健康管理; 健康状态评估; 健康状态评估率; 故障预测率; 可用度

**中图分类号:** TP806    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-2486(2025)06-287-09



论文  
拓展

## Equipment health evaluation index determination method

YANG Peng\*, ZHANG Yong, QIU Jing, LIU Guanjun

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The PHM index is directly affected the design of PHM and the availability of equipment. In response to the shortage of theoretical and implementable methods, a graded demonstration method was introduced, outlining a progression from comprehensive efficiency indicators to PHM comprehensive indicators and then to PHM capability indicators. The availability was selected as the comprehensive efficiency indicator, and the health evaluation rate was defined as the PHM comprehensive indicator. The relationship between availability and health evaluation rate was derived. The optimal health evaluation rate was obtained by maximizing the availability. It was deduced that the health evaluation rate was equal to the product of fault coverage and evaluation accuracy, where depend on the number of sensors and the accuracy of diagnostic/prognostic methods, respectively. This conclusion can guide PHM design. The effectiveness and practicality of this method were verified by cases.

**Keywords:** prognostics and health management; health evaluation; health evaluation rate; fault prediction accuracy; availability

随着装备机械化、信息化、智能化“三化”的融合发展,装备状态监控、故障诊断等技术正朝着故障预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)技术发展。国内外开展了大量研究,尤其是在信号获取、特征提取、健康状态等级划分、健康状态评估等几个关键环节取得了显著进步<sup>[1-4]</sup>。PHM指标既是开展PHM设计的输入和目标,也是开展装备PHM能力考核的依据,因此开展装备PHM指标论证研究具有重要的工程实践意义与理论价值。

在指标定义及选择方面,隆金波等<sup>[5]</sup>借鉴AIR5909等国外标准,从监测及诊断、预测、决策

评价三个方面构建了机电系统PHM评价指标体系。徐玉国<sup>[6]</sup>提出了描述装备PHM系统故障预测能力的准确率、虚警率和漏检率三个指标。杨述明<sup>[7]</sup>从“准确性”和“时效性”两个方面定义了故障可预测率、故障正确预测率、故障预测率、故障预测时间等指标。杨占才等<sup>[8]</sup>提出了预测覆盖率,用于描述故障预测系统预测能力的覆盖程度。谭晓栋<sup>[9]</sup>提出了故障可跟踪率、故障正确跟踪率等指标及预计方法。赵志傲<sup>[10]</sup>从故障模式和退化过程二维特性出发,提出了两个以预测故障发生时间为输出目标的装备PHM系统故障预测能力度量指标及验证方法。文献[11]将诊断

收稿日期:2023-10-25

基金项目:国家部委基金资助项目(50902060201)

\*第一作者:杨鹏(1978—),男,湖北宜昌人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:nudtyp7894@163.com

引用格式:杨鹏,张勇,邱静,等.装备健康状态评估指标论证方法[J].国防科技大学学报,2025,47(6):287-295.

Citation: YANG P, ZHANG Y, QIU J, et al. Equipment health evaluation index determination method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(6): 287-295.

与预测性能指标视为 PHM 系统的能力考核指标。以上研究主要针对故障预测能力,并未涉及健康状态评估能力这一 PHM 关键能力,对此有必要做进一步研究。

在指标论证方面,文献[11]针对民用飞机给出了故障成功检测率应大于 97%、误报率不超过 4%、隔离率应大于 95%、失效预报率应达到 90% (阈值)~98% (目标值) 的指标要求,但未给出论证方法。考虑到健康感知或健康管理可视为传统测试性的提升和拓展,二者具有相似性,它们都反映了对装备技术状态的感知能力,前者是对故障的感知能力,后者是对健康状态的感知能力。因此,可借鉴测试性指标论证方法来研究针对 PHM 指标的论证方法。现有测试性指标论证方法中研究较多的是模型法,其基本思想是建立测试性指标与相关指标的数学关系模型,代入相关指标的取值,求解出测试性指标。代表性的模型法有两种:一种是基于测试性与可靠性、维修性等通用质量特性之间的关系模型,通过优化权衡来确定测试性指标,称为权衡分析法<sup>[12~13]</sup>,文献[14]在对上述关系模型推导的基础上,提出了一种可靠性、战备完好性和可维性 (reliability, operational readiness and maintainability, ROM) 模型论证法;另一种是利用 Petri 网构建装备测试、诊断和维修活动的数学模型,再通过数值分析方法确定测试性指标,可统称为 Petri 网法<sup>[15~18]</sup>。这两种方法不论采取哪种,都需要结合 PHM 指标的定义做适应性研究,从而得到科学合理的 PHM 指标。

针对上述问题,本文首先给出健康状态评估能力指标定义,给出数学公式并进行分析,然后提出一种以可用度为顶层指标求解健康状态评估指标的方法,最后进行案例分析。

## 1 总体技术路线

PHM 能力评价指标很多,大多仅描述某单一方面的能力,若平行开展指标论证,则工作量较大,且不易理清各指标间的关系。对此,采取分级论证:将装备指标体系自顶向下分层,顶层为装备使用效能指标,作为输入;二级为 PHM 综合性能指标;三级为 PHM 分解能力指标。二、三级指标采取逐级论证的方式得到。本文主要解决二级指标论证问题,具体涉及三个问题:①确定哪些指标用来作为顶层、二级指标;②确定顶层、二级指标间的关系;③给出由顶层指标求解二级指标的具体方法。针对上述问题,本文给出的技术路线如图 1 所示。

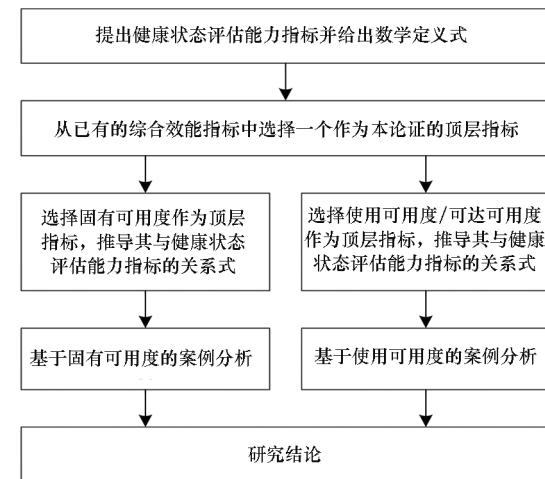


图 1 指标论证的技术流程

Fig. 1 Technical flowchart of the index determination

**步骤 1:** 指标的提出。从 PHM 能力指标中选择一个综合性指标并给出其定义式。详见 2.1 节。

**步骤 2:** 确定顶层指标。从各种效能指标中选择可用度作为顶层指标。详见 2.2 节。

**步骤 3:** 基于固有可用度的指标论证方法。详见 2.3 节。

**步骤 4:** 基于使用可用度/可达可用度的指标论证方法。详见 2.4 节。

**步骤 5:** 案例分析。演示指标论证过程,分析中间变量对指标的影响。详见第 3 节。

**步骤 6:** 进行总结。详见第 4 节。

## 2 指标论证方法

### 2.1 健康状态评估率指标的提出

PHM 能力主要包括状态监控、故障诊断、故障或寿命预测、健康评估、维修决策等。上述能力的核心是评判装备的健康状态,据此定义健康状态评估率,记为  $\gamma_{HE}$ 。参考故障诊断率、预测率等指标定义,将其定义为在规定时间和条件下,正确评估(含诊断和预测)的故障数与已发生的和未来将要发生的全部故障数的比值,其定义式为:

$$\gamma_{HE} \triangleq \frac{\lambda_{FE}}{\lambda_s} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_s$  和  $\lambda_{FE}$  分别表示装备在单位时间内发生的和评估出的故障次数,即故障率。

该指标综合了故障诊断、预测和状态评估等多项 PHM 功能,可将其作为 PHM 二级指标。一旦确定了该指标,即可由它进一步论证诊断率、预测率等三级指标。

## 2.2 顶层指标的选择

装备使用效能指标包括可用度、出动率、任务成功率、战备完好率等,这些指标都可以用来作为PHM指标论证的输入。考虑到可用度是目前使用最多的效能指标,本文选择它作为顶层指标。可用度可进一步分为固有可用度、可达可用度、使用可用度等。其中,固有可用度仅考虑装备工作时间和修复性维修时间,可达可用度考虑装备工作时间、修复性维修和预防性维修时间,使用可用度在可达可用度基础上进一步考虑修复延误时间。考虑到可达可用度与使用可用度定义相差不大,下面选取固有可用度和使用可用度为顶层指标来介绍本方法。

## 2.3 基于固有可用度的指标论证

### 2.3.1 固有可用度与健康状态评估率的关系式推导

定义固有可用度为:

$$A_{IE} = \frac{T_{MTBF-SE}}{T_{MTBF-SE} + T_{MTTR-SE}} \quad (2)$$

式中,  $A_{IE}$ 、 $T_{MTBF-SE}$ 、 $T_{MTTR-SE}$  分别表示装备具有 PHM 系统时的固有可用度、平均故障间隔时间、平均维修时间。

希望把式(2)变成包含  $\gamma_{HE}$  的公式,进而通过使  $A_{IE}$  最大化来求解  $\gamma_{HE}$ 。

先推导  $T_{MTBF-SE}$ 。不妨令装备故障服从指数分布,则有:

$$T_{MTBF-SE} = \frac{1}{\lambda_{SE}} = \frac{1}{\lambda_S + \lambda_E + \lambda_{FA}} \quad (3)$$

式中,  $\lambda_{SE}$ 、 $\lambda_E$ 、 $\lambda_{FA}$  分别表示在单位时间内 PHM 系统报出的故障次数、发生的故障次数、报出的虚警次数。

令  $\gamma_{FA}$  表示 PHM 系统的广义虚警率(包含诊断虚警和预测虚警),有:

$$\gamma_{FA} = \frac{\lambda_{FA}}{\lambda_{FA} + \lambda_{FE}} \quad (4)$$

$$A_{IE} = \frac{\frac{(1 - \gamma_{FA}) T_{MTBF-S}}{1 - (1 - \gamma_{HE}) \gamma_{FA} + \beta(1 - \gamma_{FA})}}{\frac{(1 - \gamma_{FA}) T_{MTBF-S}}{1 - (1 - \gamma_{HE}) \gamma_{FA} + \beta(1 - \gamma_{FA})} + \left[ 1 - \frac{(1 - k)(1 - \gamma_{FA}) \gamma_{HE}}{(1 + \beta)(1 - \gamma_{FA}) + \gamma_{HE} \gamma_{FA}} \right] T_{MTTR-S}} \quad (12)$$

式(12)中,  $T_{MTBF-S}$ 、 $T_{MTTR-S}$  可通过老装备使用统计数据获得。作为新装备论证时的输入数据,  $k$  表示有无 PHM 系统时平均维修故障的时间之比,根据航空机载设备和系统的使用经验,其一般取值为 0.4,因此这三个变量在本文中视为已知量;

再令

$$\beta = \frac{\lambda_E}{\lambda_S} \quad (5)$$

将式(1)、式(4)~(5)代入式(3),可得:

$$T_{MTBF-SE} = \frac{1 - \gamma_{FA}}{[1 - (1 - \gamma_{HE}) \gamma_{FA} + \beta(1 - \gamma_{FA})] \lambda_S} \\ = \frac{(1 - \gamma_{FA}) T_{MTBF-S}}{1 - (1 - \gamma_{HE}) \gamma_{FA} + \beta(1 - \gamma_{FA})} \quad (6)$$

式中,  $T_{MTTR-S} = 1/\lambda_S$ , 表示装备不带 PHM 系统时的平均故障间隔时间。

再推导  $T_{MTTR-SE}$ 。当装备有 PHM 系统时,其平均维修时间通常为 PHM 系统发现故障的维修时间  $t_{FE}$ 、常规的(即装备没有 PHM 系统,纯粹靠人工排故)故障维修时间  $t_{NE}$ 、PHM 系统自身故障的维修时间  $t_E$ 、PHM 系统虚警带来的维修时间  $t_{FA}$  的平均值,即

$$T_{MTTR-SE} = \frac{\lambda_{FE} t_{FE} + (\lambda_S - \lambda_{FE}) t_{NE} + \lambda_E t_E + \lambda_{FA} t_{FA}}{\lambda_S + \lambda_E + \lambda_{FA}} \quad (7)$$

显然,当装备具有 PHM 系统时,其维修故障的时间会显著缩短,不妨令

$$k = \frac{t_{FE}}{t_{NE}} \quad (8)$$

通常,PHM 系统自身故障及其虚警产生的故障维修时间与常规的故障维修时间相等,即

$$t_E = t_{FA} = t_{NE} \quad (9)$$

令  $T_{MTTR-S}$  表示装备不带 PHM 系统时的平均维修时间,显然有

$$T_{MTTR-S} = t_{NE} \quad (10)$$

将式(1)、式(4)~(5)、式(8)~(10)代入式(7),消去中间参数,可得:

$$T_{MTTR-SE} = \left[ 1 - \frac{(1 - k)(1 - \gamma_{FA}) \gamma_{HE}}{(1 + \beta)(1 - \gamma_{FA}) + \gamma_{HE} \gamma_{FA}} \right] T_{MTTR-S} \quad (11)$$

将式(7)、式(11)代入式(2),消去  $T_{MTBF-SE}$  和  $T_{MTTR-SE}$ ,得到:

$\gamma_{HE}$ 、 $\gamma_{FA}$ 、 $\beta$  是未知量,其中  $\gamma_{HE}$  还是本文的求解目标,下面做进一步推导。

### 2.3.2 变量 $\gamma_{HE}$ 的进一步推导

装备健康状态评估率高不高取决于两个方面:①负责监测故障的感知单元(传感器、机内测

试、自动测试)是否覆盖装备的全部故障点;②诊断和预测方法能否对故障实现高准确度的诊断和预测。据此将式(1)改写为:

$$\gamma_{\text{HE}} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \psi_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \approx \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \psi \quad (13)$$

式中,  $M$  和  $m$  分别表示装备总的故障数和可监测的故障数,  $\sum_{i=1}^m \lambda_i$  和  $\sum_{i=1}^m \lambda_i \psi_i$  分别为装备总故障率和可感知的总故障率,  $\lambda_i$  和  $\psi_i$  分别表示第  $i$  故障的故障率和对该故障诊断或预测的准确率;  $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i$  为 PHM 系统对装备故障的覆盖率;  $\psi$  为对可监测故障的诊断或预测的平均准确率。

下面进一步推导  $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i$  的近似表达式。通常, 可监测的故障数  $m$  与构成 PHM 系统的感知单元数量  $n$  成正相关, 即感知单元越多, 可监测的故障越多。不妨令

$$\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} = h(n) \quad (14)$$

下面进一步推导  $h(n)$ 。除上述规律之外, 当故障覆盖率增至逼近上限 1 时, 即使  $n$  继续增加, 它也不再增大。据此可知,  $h(n)$  应该是一个上凸的抛物线函数, 具有以下性质:① 定义域和值域分别为  $[0, \infty)$  和  $[0, 1]$ ; ② 单调递增, 且  $h(0) = 0$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} h(n) = 1$ ; ③ 增速单调递减, 即  $h'(n) \geq 0$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} h'(n) = 0$ 。

式(15)指数形式的函数可满足上述性质。

$$h(n) = 1 - \alpha_1^n \quad (15)$$

式中,  $\alpha_1$  为待定参数, 可通过改变参数取值来改变函数  $h(n)$  的上升速度。

将式(14)~(15)代入式(13), 可得:

$$\gamma_{\text{HE}} = (1 - \alpha_1^n) \psi \quad (16)$$

式中:  $\psi$  的取值范围为  $[0, 1]$ ;  $\alpha_1$  为待定参数, 其取值满足当  $n$  逼近故障数  $M$  时,  $1 - \alpha_1^n$  逼近 1。表 1 列举了不同  $M$  时  $\alpha_1$  的取值建议。

### 2.3.3 变量 $\gamma_{\text{FA}}$ 的进一步推导

$\gamma_{\text{FA}}$  为广义虚警率, 根据式(4), 它由  $\lambda_{\text{FA}}$  和  $\lambda_{\text{FE}}$  决定。首先, 综合式(1)、式(16), 有:

$$\lambda_{\text{FE}} = (1 - \alpha_1^n) \psi \lambda_s \quad (17)$$

其次,  $\lambda_{\text{FA}}$  与感知单元  $n$  的关系如下: 当  $n$  较小时,  $\lambda_{\text{FA}}$  随  $n$  的增大而快速增大; 当  $n$  较大时, 可能出

表 1  $\alpha_1$  取值

Tab. 1 Values of  $\alpha_1$

$M$	$\alpha_1$	$M$	$\alpha_1$	$M$	$\alpha_1$
10	0.631 0	100	0.955 0	1 000	0.995 4
20	0.794 3	150	0.969 8	1 500	0.996 9
30	0.857 7	200	0.977 2	2 000	0.997 7
40	0.891 3	250	0.981 7	2 500	0.998 2
50	0.912 0	300	0.984 8	3 000	0.998 5
60	0.926 1	350	0.986 9	3 500	0.998 7
70	0.936 3	400	0.988 6	4 000	0.998 8
80	0.944 1	450	0.989 8	5 000	0.999 1
90	0.950 1	500	0.990 8	10 000	0.999 5

现冗余的感知单元, 此时通过相互证实可能过滤一部分虚警, 即  $\lambda_{\text{FA}}$  随着  $n$  的进一步增大而缓慢增大。据此, 参考函数  $h(n)$ , 将  $\lambda_{\text{FA}}$  表示为:

$$\lambda_{\text{FA}} = \alpha_{21} (1 - \alpha_{22}^n) \quad (18)$$

式(18)中,  $\alpha_{21}$  和  $\alpha_{22}$  为待定参数, 其取值满足: 当  $n$  逼近故障数  $M$  时,  $(1 - \alpha_{22}^n)$  逼近 1,  $\gamma_{\text{FA}}$  逼近虚警率上限。表 2 列举了  $\psi$  取值为 0.95,  $\gamma_{\text{FA}}$  不超过 0.08, 不同  $M$  时  $\alpha_{21}$  的取值。 $\alpha_{22}$  的取值与  $\alpha_1$  的取值相同。

表 2  $\alpha_{21}$  取值

Tab. 2 Values of  $\alpha_{21}$

$M$	10	50	100	500	1000
$\alpha_{21}$	0.817 8	4.089 1	8.178 3	40.891 3	81.782 6

将式(17)~(18)代入式(4), 得到:

$$\gamma_{\text{FA}} = \frac{\alpha_{21} (1 - \alpha_{22}^n)}{\alpha_{21} (1 - \alpha_{22}^n) + (1 - \alpha_1^n) \psi \lambda_s} \quad (19)$$

### 2.3.4 变量 $\beta$ 的进一步推导

$\beta$  为感知单元故障率与装备故障率之比。不妨假设每个感知单元的故障率相等, 则有:

$$\beta = \frac{\lambda_{\text{H}}}{\lambda_s} = \frac{\alpha_3 n}{\lambda_s} \approx \frac{\alpha_3 n}{M \bar{\lambda}} \quad (20)$$

式中:  $\bar{\lambda}$  表示被测故障的平均故障率;  $\alpha_3$  为待定参数, 表示单个感知单元的故障率。通常要求感知单元的可靠性比被测对象高一个数量级, 即当  $n$  逼近  $M$  时,  $\alpha_3 / \bar{\lambda} \leq 0.1$ , 可据此设定  $\alpha_3$  的取值。

通过上文推导, 将变量  $\gamma_{\text{HE}}$ 、 $\gamma_{\text{FA}}$  和  $\beta$  表示为变量  $n$  的函数; 将式(16)、式(19)~(20)代入式(12), 将  $A_{\text{IE}}$  表示为变量  $n$  的函数; 绘制  $A_{\text{IE}}$  曲线, 得到使  $A_{\text{IE}}$  最大或使其刚好满足要求时对应的  $n$  值, 将其代入式(16), 得到  $\gamma_{\text{HE}}$ 。上述步骤中还涉及一些中间变量, 如  $\alpha_1$ 、 $\alpha_{21}$ 、 $\alpha_{22}$  和  $\alpha_3$ , 需要在计

算前确定它们的取值。

## 2.4 基于使用可用度/可达可用度的指标论证

定义使用可用度为:

$$A_O = \frac{T_{MTBM}}{T_{MTBM} + T_{MDT}} \quad (21)$$

式中,  $A_O$ 、 $T_{MTBM}$  和  $T_{MDT}$  分别表示使用可用度、平均维修间隔时间和平均不能工作时间。 $T_{MTBM}$  包括累积工作时间(记为  $T_o$ )和累积待机时间(记为  $T_v$ )、 $T_{MDT}$  包括修复性维修时间(记为  $T_{CM}$ )和预防性维修时间(记为  $T_{PM}$ )。

$$T_{MTBM} = T_o + T_v \quad (22)$$

$$T_{MDT} = T_{CM} + T_{PM} \quad (23)$$

式中:  $T_{CM}$  包括平均维修时间和平均延误时间;  $T_{PM}$  在没有 PHM 系统时主要是定时维修时间, 因为是有准备的维修, 所以仅有平均维修时间。于是有:

$$T_{CM} = \frac{T_o}{T_{MTBF-S}} (T_{MTTR-S} + T_{MLD}) \quad (24)$$

$$T_{PM} = \frac{T_o \cdot T_{MTTR-S}}{T_{MTBPM-S}} \quad (25)$$

其中,  $T_{MLD}$  表示平均后勤延误时间,  $T_{MTBPM-S}$  表示平均预防性维修间隔时间,  $T_o/T_{MTBF-S}$  和  $T_o/T_{MTBPM-S}$  分别表示工作时间内的故障后维修次数(等于发生的故障数)和预防性维修次数。

$$A_{OE} = \frac{T_o + T_v}{T_o + T_v + \frac{T_o[(1 - \alpha_1^n)(1 - \rho) + \alpha_1^n](T_{MTTR-SE} + T_{MLD})}{T_{MTBF-SE}} + \frac{T_o(1 - \alpha_1^n)\rho T_{MTTR-SE}}{T_{MTBF-SE}}} \quad (29)$$

将式(6)、式(11)代入式(29), 即可得到  $A_{OE}$  的最终表达式。

在给定  $T_o$ 、 $T_v$  和  $T_{MLD}$  时, 式(29)与式(12)相比还多了一个变量  $\rho$ 。在后面的案例中, 将分析该变量对指标的影响。

若不考虑延误时间, 则去掉式(29)中的  $T_{MLD}$  即可得到可达可用度  $A_{AE}$  的表达式。

## 3 案例分析

考虑到可达可用度与使用可用度定义相差不大, 下面仍选取固有可用度和使用可用度作为顶层指标来演示本文方法, 并分析中间变量对指标论证结果的影响。

### 3.1 基于固有可用度的案例分析

以可用度为顶层指标演示健康状态评估率的论证过程, 分析参数  $\psi$  对指标的影响, 并与战备完好率做顶层指标的论证结果进行比较。

#### 3.1.1 指标 $\gamma_{HE}$ 论证过程演示

参考文献[14]中的数据,  $T_{MTBF-S} = 150$  h,

综合式(21)~(25), 有:

$$A_O = \frac{T_o + T_v}{T_o + T_v + \frac{T_o}{T_{MTBF-S}}(T_{MTTR-S} + T_{MLD}) + \frac{T_o \cdot T_{MTTR-S}}{T_{MTBPM-S}}} \quad (26)$$

设计 PHM 系统后可知: ①受 PHM 系统影响, 平均故障间隔时间由  $T_{MTBF-S}$  变为  $T_{MTBF-SE}$ , 平均维修时间由  $T_{MTTR-S}$  变为  $T_{MTTR-SE}$ ; ②对可预测故障实现视情维修, 其维修时间仅含平均维修时间; ③对非可预测故障只能采取事后维修, 其维修时间为平均维修时间加延误时间。不妨令可预测故障数与可监测故障数量之比为  $\rho$ , 对式(24)和式(25)分别进行修改, 得到:

$$T_{CM} = \frac{T_o[(1 - \alpha_1^n)(1 - \rho) + \alpha_1^n](T_{MTTR-SE} + T_{MLD})}{T_{MTBF-SE}} \quad (27)$$

$$T_{PM} = \frac{T_o(1 - \alpha_1^n)\rho T_{MTTR-SE}}{T_{MTBF-SE}} \quad (28)$$

式中,  $(1 - \alpha_1^n)(1 - \rho) + \alpha_1^n$  为非可预测故障占工作时间内总故障的比例,  $(1 - \alpha_1^n)\rho$  为可预测故障占总故障的比例。

再令带有 PHM 系统的使用可用度为  $A_{OE}$ , 综合式(21)~(23)、式(27)~(28), 有:

$T_{MTTR-S} = 30$  h,  $M = 57$ 。不妨令  $k = 0.4$ 、 $\psi = 0.95$ , 可算得参数  $\alpha_1 = 0.9224$ 、 $\alpha_{21} = 5.4522 \times 10^{-4}$ 、 $\alpha_{22} = 0.9224$ 、 $\alpha_3 = 1.1696 \times 10^{-5}$ 。绘制出  $A_{IE}$ 、 $\gamma_{HE}$  和  $\gamma_{FA}$  随变量  $n$  的变化曲线, 如图 2、图 3 所示。

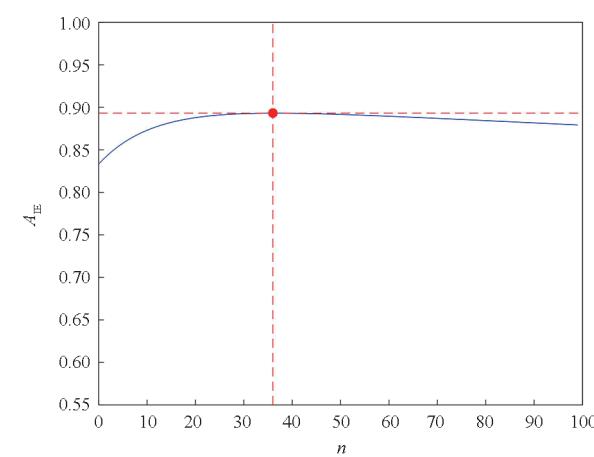
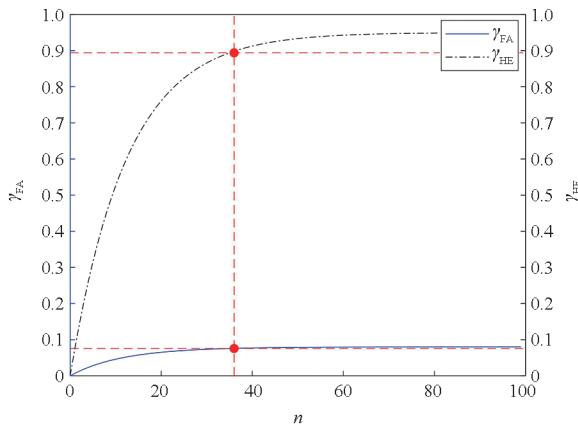


图 2 函数  $A_{IE}$  曲线

Fig. 2 Curve of function  $A_{IE}$

图 2 是  $A_{IE}$  随  $n$  的变化曲线, 可以看出: ①  $A_{IE}$

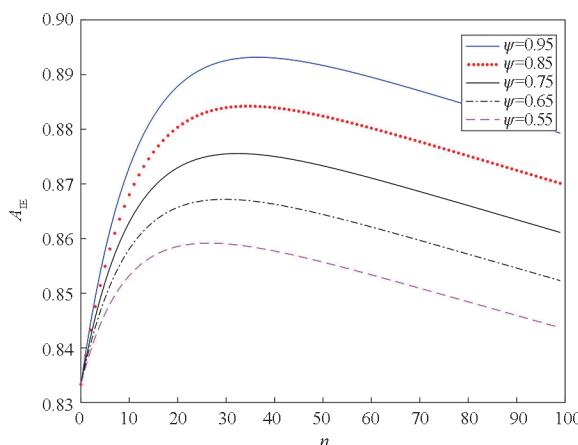
图 3 案例 1 函数  $\gamma_{\text{FA}}$  和  $\gamma_{\text{HE}}$  曲线Fig. 3 Curves of function  $\gamma_{\text{FA}}$  and  $\gamma_{\text{HE}}$  in case 1

曲线表现出先升后降的特点,这说明增加感知单元数量可提升装备固有可用度,但是过多的感知单元反而有害;②可用度极大值点位于  $n = 36$  处,即当感知单元数量为 36 时,可使固有可用度最大。

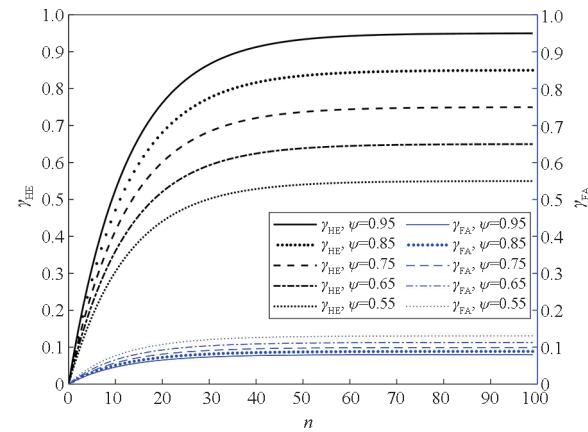
图 3 是案例 1 函数  $\gamma_{\text{HE}}$  和  $\gamma_{\text{FA}}$  随  $n$  的变化曲线,可以看出:① $\gamma_{\text{HE}}$ 、 $\gamma_{\text{FA}}$  均随  $n$  逐渐增大;② $\gamma_{\text{HE}}$  在  $n$  位于区间  $[0, 40]$  时增速较大,而在区间  $(40, 100]$  变化平缓;③ $\gamma_{\text{FA}}$  在  $n$  区间  $[0, 40]$  增速较大,而在区间  $(40, 100]$  变化平缓。这与前文对  $\gamma_{\text{HE}}$  和  $\gamma_{\text{FA}}$  的分析结论一致。取  $n = 36$ ,可得  $\gamma_{\text{HE}} = 0.8982$ , $\gamma_{\text{FA}} = 0.0756$ 。

### 3.1.2 参数 $\psi$ 对指标的影响分析

依次取  $\psi = 0.95$ 、 $\psi = 0.85$ 、 $\psi = 0.75$ 、 $\psi = 0.65$ 、 $\psi = 0.55$ ,其他参数仍采用前面的设置,绘制  $A_{\text{IE}}$ 、 $\gamma_{\text{HE}}$  和  $\gamma_{\text{FA}}$  曲线,如图 4、图 5 所示。

图 4 不同  $\psi$  时的函数  $A_{\text{IE}}$  曲线Fig. 4 Curves of function  $A_{\text{IE}}$  with different  $\psi$ 

由图 4 可知:随着  $\psi$  的增大,  $A_{\text{IE}}$  曲线整体上移,这说明诊断或预测算法准确度越高,使用可用度越高。由图 5 可知:随着  $\psi$  的增大,  $\gamma_{\text{HE}}$  曲线整

图 5 不同  $\psi$  时的函数  $\gamma_{\text{FA}}$  和  $\gamma_{\text{HE}}$  曲线Fig. 5 Curves of function  $\gamma_{\text{FA}}$  and  $\gamma_{\text{HE}}$  with different  $\psi$ 

体上移,而  $\gamma_{\text{FA}}$  曲线整体下移,这说明准确度增大带来  $\gamma_{\text{HE}}$  指标的提升和广义虚警率的下降,这与前文分析结果一致。

### 3.1.3 同已有方法对比

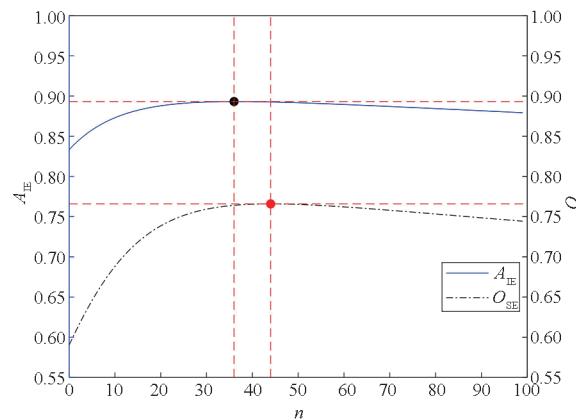
文献[14]基于战备完好率论证诊断率指标,其关键公式为:

$$O_{\text{SE}} = \exp\left(-\frac{t_n}{K_R T_{\text{MTBF-S}}}\right) + \left[1 - \exp\left(-\frac{t_r}{K_M T_{\text{MTTR-S}}}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{t_n}{K_R T_{\text{MTBF-S}}}\right)\right] \quad (30)$$

式中,  $O_{\text{SE}}$  表示带有 PHM 系统的装备的战备完好率,  $t_r$  表示修理时间,  $t_n$  表示从接到作战任务到任务结束所经历的时间。将式(30)中的参数  $K_R$  和  $K_M$  推导过程涉及的诊断率和虚警率分别替换成本文的健康状态评估率和广义虚警率,并采用本文的参数估算方法进行指标计算。

应用上述仿真算例数据,此外利用文献[14]中的数据  $t_n = 240$  h、 $t_r = 20$  h,计算并绘制  $O_{\text{SE}}$  和  $A_{\text{IE}}$  随变量  $n$  的变化曲线,如图 6 所示。

可以看出:①两条曲线趋势一致;②固有可用度整体高于战备完好率,这是因为二者计算式有所不同,前者为分数式,而后者为指数式,此外还与给定的  $T_{\text{MTBF-S}}$  和  $T_{\text{MTTR-S}}$  有关,但这一差别对求解  $\gamma_{\text{HE}}$  指标影响不大;③ $O_{\text{SE}}$  曲线的极大值点位于  $n = 45$  处,不同于  $A_{\text{IE}}$  的  $n = 36$ ,这与二者的计算式有关,这一差别将影响  $\gamma_{\text{HE}}$  指标结果,将  $n = 45$  代入式(16)和式(18),得到  $\gamma_{\text{HE}} = 0.9228$ , $\gamma_{\text{FA}} = 0.0779$ 。可见基于相同数据,由固有可用度得到的指标略高于由战备完好率得到的指标,这是二者定义式的不同造成的差异,对指标计算结果影响不大。

图 6 函数  $O_{SE}$  和  $A_{IE}$  曲线Fig. 6 Curves of function  $O_{SE}$  and  $A_{IE}$ 

### 3.2 基于使用可用度的案例分析

以可用度为顶层指标演示健康状态评估率的论证过程,并分析参数  $\rho$  对指标的影响。

#### 3.2.1 确定指标 $\gamma_{HE}$

据文献[19]中的数据,某装备年均应工作5 000 h,工作中的平均故障间隔时间为50 h,平均故障维修时间为30 min,维修故障因时间管理和资源保障方面所造成的平均延误时间不超过20 h,规定装备每工作1 000 h需要进行10 h的预防性维修,装备每年还有12 d因转移运输而停用。根据上述条件,有  $T_o = 5 000$  h,  $T_{MLD} = 20$  h,  $T_{MTBF-S} = 50$  h,  $T_{MTTR-S} = 0.5$  h,  $T_{MTBPM-S} = 10$  h。

下面计算累积待机时间  $T_v$ ,它可理解为装备可工作但不工作的累积时间,通常不会直接给定,可用全年总小时数(记为  $T_w$ )减去累积工作时间  $T_o$ 、累积转移运输停用时间(记为  $T_z$ )、累积维修时间(记为  $T_u$ )后的剩余时间表示,即

$$T_v = T_w - T_z - T_o - T_u \quad (31)$$

式中,  $T_w = 365 \times 24$  h = 8 760 h,  $T_z = 12 \times 24$  h = 288 h,  $T_u = T_{CM} + T_{PM}$ , 根据式(24)~(25), 有  $T_{PM} = 50$  h,  $T_{CM} = 2 050$  h。将上述参数代入式(26), 可得  $A_0 = 0.752$ 。这是没有进行 PHM 系统设计时装备的使用可用度。

设计 PHM 系统后,用式(29)计算使用可用度。文献[19]中未提供装备故障数,考虑到在实际开展指标论证时,无法获取准确的故障数,对此可将组成设备或可更换单元的数目视为故障数,不妨令  $M = 85$ 。再令  $k = 0.4$ 、 $\psi = 0.9$ 、 $\rho = 0.25$ , 算得  $\alpha_1 = \alpha_{22} = 0.947$  3、 $\alpha_{21} = 0.001$  5、 $\alpha_3 = 2.352$  9  $\times 10^{-5}$ 。

据此,绘制出  $A_{OE}$ 、 $\gamma_{HE}$  和  $\gamma_{FA}$  随变量  $n$  的变化

曲线,如图 7、图 8 所示。

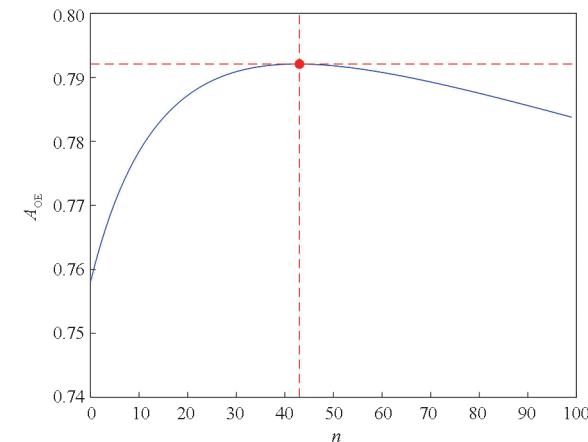
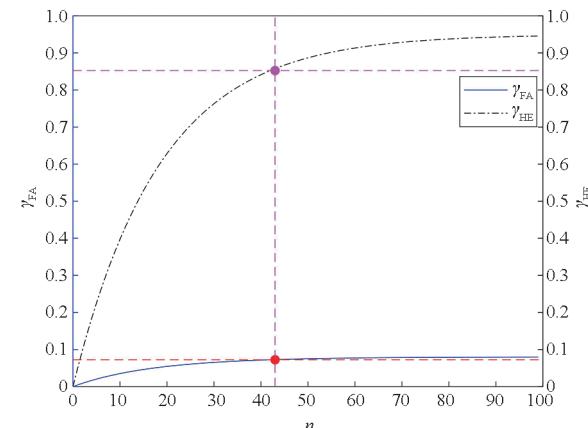
图 7 函数  $A_{OE}$  曲线Fig. 7 Curve of function  $A_{OE}$ 图 8 案例 2 函数  $\gamma_{FA}$  和  $\gamma_{HE}$  曲线Fig. 8 Curves of function  $\gamma_{FA}$  and  $\gamma_{HE}$  in case 2

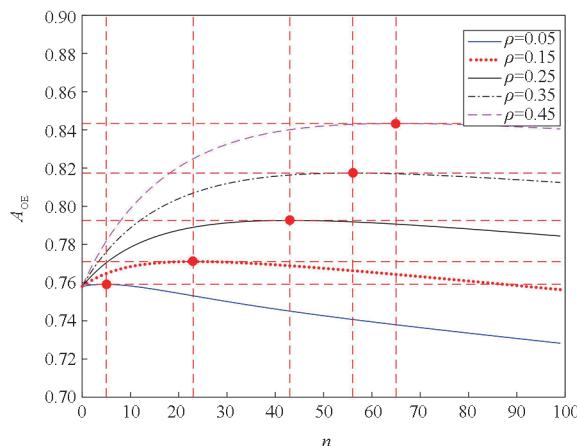
图 7 为使用可用度  $A_{OE}$  随  $n$  的变化曲线,可以看出:①曲线表现出先升后降的特点;②极大值点位于  $n = 43$  处,此时  $A_{OE} = 0.792$  6。相比未设计 PHM 系统,该装备使用可用度可提升 0.04。

图 8 是案例 2 函数  $\gamma_{HE}$  和  $\gamma_{FA}$  随  $n$  的变化曲线,取  $n = 43$ ,可得  $\gamma_{HE} = 0.807$  5,  $\gamma_{FA} = 0.072$  4。

#### 3.2.2 $\rho$ 对指标的影响分析

依次设置  $\rho = 0.05$ 、 $\rho = 0.15$ 、 $\rho = 0.25$ 、 $\rho = 0.35$ 、 $\rho = 0.45$ ,绘制  $A_{OE}$  随  $n$  的变化曲线,如图 9 所示。

可以看出:①随着  $\rho$  的增大,  $A_{OE}$  曲线整体上移,这说明随着可预测故障占比的增大,使用可用度显著提升;②随着  $\rho$  的增大,  $A_{OE}$  极大值点对应的  $n$  值变大,相应地,带来  $\gamma_{HE}$  指标的提升,这是因为随着可预测故障数的增加,只要针对这些故障相应增加感知单元数即可提升健康状态评估率。以上结论与理论分析结果是一致的。

图 9 不同  $\rho$  时的函数  $A_{OE}$  曲线Fig. 9 Curves of function  $A_{OE}$  with different  $\rho$ 

## 4 结论

本文定义了一种 PHM 能力指标——健康状态评估率,给出了由装备可用度作为输入论证该指标的方法,并进行了案例分析,主要结论如下:

- 1) 定义健康状态评估率作为 PHM 综合能力指标是合理的,实施分解指标论证是可行的。
- 2) 推导发现,健康状态评估率可表示为故障覆盖率与评估准确度的乘积,前者与感知单元充分与否相关,后者与诊断/预测方法准确性相关,这对开展 PHM 设计有指导意义。

3) 案例分析发现,装备可预测故障占比越高,带来的可用度增益越大,这对开展 PHM 预测能力设计有指导意义。

4) 三种可用度均可用于健康状态评估率指标论证。实际中宜优先选用所需参数多的可用度作为输入,因为参数越多,论证结果越可信。

5) 与已有方法对比发现,二者曲线相似,结果较为相近,相互佐证了有效性。鉴于实际中可用度应用更普遍,且涉及参数较少,因此本方法具有更好的适用性。

## 参考文献 (References)

- [1] 袁利, 王淑一. 航天器控制系统智能健康管理技术发展综述 [J]. 航空学报, 2021, 42(4): 525044.  
YUAN L, WANG S Y. A review on development of intelligent health management technology for spacecraft control systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 525044. (in Chinese)
- [2] 郭丞皓, 于劲松, 宋锐, 等. 基于数字孪生的飞机起落架健康管理技术 [J]. 航空学报, 2023, 44(11): 227629.  
GUO C H, YU J S, SONG Y, et al. Application of digital twin based aircraft landing gear health management technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 227629. (in Chinese)
- [3] 司小胜, 胡昌华. 数据驱动的设备剩余寿命预测理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 173–180.  
SI X S, HU C H. Data-driven remaining useful life prediction theory and applications for equipment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 173–180. (in Chinese)
- [4] 李国发, 王彦博, 何佳龙, 等. 机电装备健康状态评估研究进展及发展趋势 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(2): 267–279.  
LI G F, WANG Y B, HE J L, et al. Research progress and development trend of health assessment of electromechanical equipment [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(2): 267–279. (in Chinese)
- [5] 隆金波, 曲昌琦, 蒋觉义. 典型机电系统 PHM 评价指标分析 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 255–259.  
LONG J B, QU C Q, JIANG J Y, et al. Research on PHM evaluation index and life prediction model of typical electromechanical system [J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(6): 255–259. (in Chinese)
- [6] 徐玉国. 装备自主维修保障关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 55–82.  
XU Y G. Research on key technologies for equipment autonomic logistics [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 55–82. (in Chinese)
- [7] 杨述明. 面向装备健康管理的可测性技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 29–36.  
YANG S M. Research on testability technology for equipment health management [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 29–36. (in Chinese)
- [8] 杨占才, 安茂春, 王红. 对发展故障预测和健康管理技术的探讨 [J]. 测控技术, 2012, 31(11): 107–110.  
YANG Z C, AN M C, WANG H. Exploratory study of developing prognostics and health management technology [J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(11): 107–110. (in Chinese)
- [9] 谭晓栋. 面向装备健康状态评估的可测性设计关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 38–44.  
TAN X D. Research on key technologies of design for testability for health state evaluation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 38–44. (in Chinese)
- [10] 赵志傲. 装备 PHM 系统故障预测能力验证技术 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 21–43.  
ZHAO Z A. Research on validation technology of prognostics capability of equipment PHM System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 21–43. (in Chinese)
- [11] 吕镇邦, 崔广宇, 王轶. 民用客机健康管理系统 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020: 354–361.  
LYU Z B, CUI G Y, WANG Y. Civil aircraft health management system [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020: 354–361. (in Chinese)
- [12] 田仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 71–89.

TIAN Z, SHI J Y. System testability design analysis and evaluation [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2003: 71–89. (in Chinese)

[13] 祝华远, 李军亮, 张陕辉. 舰载机通用质量特性指标论证 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(8): 185–189.

ZHU H Y, LI J L, ZHANG X H. Demonstration of carrier-based aircraft universal quality characteristic indicator [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(8): 185–189. (in Chinese)

[14] 杨鹏, 邱静, 刘冠军, 等. 一种基于 ROM 模型的测试性指标论证方法 [J]. 航空学报, 2021, 42(12): 324717.

YANG P, QIU J, LIU G J, et al. Testability index determination method based on ROM model [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(12): 324717. (in Chinese)

[15] 白力舸, 王华茂, 闫金栋. 基于 DSPN 的航天器系统级可测试性指标确定方法 [J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 127–133.

BAI L G, WANG H M, YAN J D. Spacecraft system testability figure requirement determination method based on DSPN [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(6): 127–133. (in Chinese)

[16] 王小强, 韩斌. 基于 GSPN 的飞机测试性指标确定方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(4): 13–15, 18.

WANG X Q, HAN B. Research on determination method for testability index of aircraft based on GSPN [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(4): 13–15, 18. (in Chinese)

[17] 翟禹尧, 史贤俊, 吕佳朋. 基于广义随机 Petri 网的导弹系统测试性建模与指标评估方法研究 [J]. 兵工学报, 2019, 40(10): 2070–2079.

ZHAI Y Y, SHI X J, LYU J P. Research on evaluation method for testability index and modeling of missile system based on GSPN [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(10): 2070–2079. (in Chinese)

[18] 张宁, 林海华, 孙亚平. 鱼雷装备测试维修 Petri 网模型与指标论证分析 [J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 886–894.

ZHANG N, LIN H H, SUN Y P. Analysis of Petri net model and index demonstration for torpedo equipment testing and maintenance [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(3): 886–894. (in Chinese)

[19] 张晓今, 张为华, 江振宇. 导弹系统性能分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 171–172.

ZHANG X J, ZHANG W H, JIANG Z Y. Performance analysis of missile system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 171–172. (in Chinese)