

# 基于测试数据的装备健康状态评估方法

罗珩娟, 刘丙杰, 陈建华

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266199)

**摘要:** 针对当前装备健康状态评估方法无法反映健康状态变化过程的问题, 提出了一种基于测试数据的装备健康状态评估方法; 该方法通过对待测部件进行测试, 观察测试数据变化规律并对比测试数据的正常范围, 分别计算测试部件的基本健康度、健康变化率和健康变化幅度, 得到了装备动态变化过程中的健康度数学模型, 并建立了串联、并联系统的武器装备健康状态评估方法; 利用该方法分别对某型潜射导弹发动机、伺服机构液压源的测试数据进行实例分析, 结果表明该方法可准确真实反映装备健康状态的变化过程, 提供科学有效的故障预测和维修决策依据, 更加符合装备基于状态的维修要求, 提高了装备完好率和任务完成率, 具有较强的可操作性。

**关键词:** PHM; 健康状态评估; 健康度; 伺服机构

## Method of Equipment Health State Evaluation Based on Testing Data

Luo Hengjuan, Liu Bingjie, Chen Jianhua

(Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of current equipment health state evaluation methods can not reflect the changing process, a method of equipment health state evaluation based on testing data was proposed. This method observes the change rule and compares the normal range of test data by testing the equipment, calculate the basic health degree, the changing rate and changing range of health degree, a model of health evaluation in dynamic change process was proposed and a health state evaluation method for equipment of series and parallel system was established. Based on this method, actual measured submarine-launched missile engine and servo mechanism data were used for analysis, the result shows that this method can reflect the real health state during the changing process accurately, provide scientific fault prediction and maintenance decision basis, fit condition based maintenance requirement, improve equipment performance rate and mission capable rate, has a strong operational reliability.

**Keywords:** PHM; health state evaluation; health degree; servo mechanism

## 0 引言

随着现代武器装备复杂性、综合化、智能化程度的不断提高, 在保持装备性能不受影响的前提下对装备进行有效维修的问题愈加突出, 故障预测与健康管(health management, PHM)技术应运而生<sup>[1]</sup>。故障预测与健康管技术是先进测试技术、诊断技术与装备维修管理理论相结合的产物, 借助该系统识别和管理故障的发生、规划维修和决策保障, 以达到降低装备维修保障费用, 提高装备性能和任务完成率的目的。

健康状态评估作为 PHM 的一项关键技术, 是实施故障预测与维修决策的基础, 主要运用先进的检测设备提取健康特征信息, 对信息运用科学评估方法进行分类分析, 监视设备系统的健康状态, 对可能出现的故障进行预警, 提

高系统维护保障能力, 防止突发故障对任务造成影响。

目前, 装备健康状态评估方法很多, 常用的有模糊综合评价<sup>[2]</sup>、人工神经网络<sup>[3]</sup>、贝叶斯网络<sup>[4]</sup>、支持向量机<sup>[5]</sup>和深度学习<sup>[6]</sup>等。文献<sup>[3]</sup>根据影响微电网蓄电池荷电状态的 4 个主要因素, 建立了健康状态评估的 BP 神经网络, 并利用遗传算法优化 BP 神经网络, 确保达到全局最优的同时提高了收敛速度。但这种方法只能评估当前蓄电池荷电状态, 且权重和阈值的初始值对网络训练结果影响较大, 健康状态评估结果不够准确。文献<sup>[7]</sup>将长期贮存的复杂武器装备健康状态主要分为健康和故障两类, 利用基于时间修正的 D-S 证据理论评估正常损耗条件下的装备健康状态, 但该方法对装备健康状态等级分类过于简单, 且影响因素权重设定主观, 评估过程使用单一测试数据, 影响健康状态评估准确度。文献<sup>[8]</sup>利用故障树分析的方法分别对城市轨道交通牵引供电的柔性接触网和刚性接触网进行分析, 得到供电网络的健康状态评估模型, 但这种方法需要自顶至下建立故障树物理模型, 难以适用于复杂装备, 且效率低, 无法描述装备健康状态动态变化过程。

本文在使用当前测试数据确定装备健康度的基础上,

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-18。

**作者简介:** 罗珩娟(1993-), 女, 山东青岛人, 在读研究生, 主要从事导弹管理与保障方向的研究。

刘丙杰(1979-), 男, 山西曲沃人, 副教授, 主要从事导弹测试与控制方向的研究。

重点关注测试数据变化过程对装备健康度的影响，分别对装备健康度的变化程度和幅度进行了分析研究，得到了健康度变化状态下的装备健康状态评估的方法，更加符合实际情况。

## 1 健康状态评估方法

### 1.1 装备健康状态

装备的健康状态描述了装备执行设计功能的能力，表示了一种状态或者一种趋势，具体说就是装备保持一定可靠性和维修性水平的能力。保持一定可靠性是指在较长的一段时间内装备能够正常工作，保持一定维修性是指在未来一段时间内即使发生故障，也能在较短时间内修复。装备的健康状态可以分为良好、正常、注意、恶化和疾病 5 个等级，良好和正常的状态认为装备“健康”，注意状态认为装备“亚健康”，恶化和疾病状态认为装备“故障”。健康状态的装备可以不采取维修措施，能够在未来一段时间内正常运行，亚健康的装备需要引起维修保障人员注意，在未来的一段时间内装备可能退化为“故障”状态，而处于“故障”状态的装备，已经无法满足任务需要，应暂停使用并对其进行维修。

装备健康状态体现了装备能否满足作战任务的需要，影响健康状态的因素众多，且无法精确确定。现实装备使用过程中健康状态评估一般都是由测试数据结果来表现，其测试数据与标准数据偏差越大，则认为装备健康状态越差。通过收集测试数据，评估装备健康状态，对可能故障进行预测，并对故障进行定位，为精确化维修提供决策依据，促使维修方式由事后维修向基于状态的维修转变。

### 1.2 健康状态评估方法

想要对装备进行健康状态评估，首先要利用先进的测试技术获得可以直接或间接表征装备健康状态的参数信息。装备测试时，一般主要检查测试数据是不是在正常范围内。如果在正常范围内，则认为正常；否则不正常。但是，在装备测试中经常出现测试数据呈趋势性变化，如多次测试连续变小或连续变大，这种情况下仅仅以当前测试值作为判断依据并不能完全真实反映装备的健康等级程度，所以本论文提出一种复合式装备健康状态评估方法。该方法不仅能反映当前测试状态下的装备状态，还能反映装备健康的变化规律。

假设武器装备某部件测试数据的正常范围为： $[d_{\min}, d_{\max}]$ ，假设测试数据服从正态分布，某次测试数据为  $d$ ，则部件基本健康度为：

$$\begin{cases} h_b = 1, d \in [d_{\min}, d_{\max}] \\ h_b = 0, else \end{cases} \quad (1)$$

即测试数据如果符合数据正常范围要求，基本健康度为 1，若不符合，基本健康度则为 0。

部件测试数据变化率为：

$$v_n = \frac{d_n - d_{n-1}}{t}$$

如果有：

$$|v_i| = -v_i (i = 1, \dots, r) \text{ 或 } |v_i| = v_i (i = 1, \dots, r)$$

即测试数据连续  $r$  次向同一个方向变化，则装备健康变化率为：

$$h_v = -0.01n + 1.02, h_v \geq 0, n \geq 3 \quad (2)$$

其中： $n$  为连续相同一个方向变化的次数。 $h_v$  与  $n$  关系如表 1 所示。

表 1  $h_v$  与  $n$  关系

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_v$	1	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.5	0.4	0.3

即如果测试数据在正常范围内上下浮动，则健康变化率为 1，如果连续出现大于等于三次升高（或降低），则部件正在恶化，健康变化率降低。

除了考虑健康变化率，还应考虑健康变化幅度，即如果测试数据变化幅度较大，相应的健康度也要下降较快，据此定义健康变化幅度为测试数据连续变化的幅度大小。定义如下公式：

$$h_f = 1 - \left| \frac{d_n - d_{n+r}}{d_n} \right| \quad (3)$$

式中， $d_n$  为第  $n$  次测试的数据，从第  $n$  次测试的数据开始，持续一个方向变化； $d_{n+r}$  为第  $n+r$  次持续一个方向变化的测试数据。

通过上式可以看出，如果测试数据连续三次在同一个方向上发生变化，则部件健康度朝着恶化的方向发展，基本符合实际情况。部件健康度为：

$$H = h_b \times h_v \times h_f \quad (4)$$

假设装备由  $m$  个部件组成，每个部件健康度为，则串联结构的装备健康度为：

$$h_{\text{串联}} = \prod_{i=1}^m H_i \quad (5)$$

并联结构的装备健康度为：

$$h_{\text{并联}} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - H_i) \quad (6)$$

武器系统健康度为：

$$H_{\text{装备}} = h_{\text{串联}} \times h_{\text{并联}} \quad (7)$$

根据上式，结合装备测试数据即可计算装备的健康度。健康状态评估具体步骤如下。

1) 获取测试数据：使用先进检测设备定期对装备进行检测，获取直接或间接表征装备健康状态的参数指标信息。

2) 计算基本健康度  $h_b$ ：观察测试数据是否符合正常范围，如果符合，基本健康度为 1，如果不符合基本健康度为 0。

3) 计算健康变化率  $h_v$ ：观察测试数据变化方向，如果测试数据出现大于等于三次向着同一个方向发展，则证明健康状态有恶化趋势，运用公式 (2) 计算得装备健康变

化率。

4) 计算健康变化幅度  $h_f$ : 测试数据出现大于等于三次向着同一个方向变化的情况下, 分别计算变化过程中第  $r$  次测试数据相对于变化初始时刻测试数据的变化程度, 利用公式 (3) 计算健康变化幅度。

5) 计算部件健康度  $H$ : 单一部件健康度等于装备基本健康度、健康变化率和健康变化幅度三者之积。

6) 计算装备健康度  $H_{装备}$ : 判断装备各部件之间串并联情况, 根据公式 (7) 计算武器系统健康度。

## 2 实例验证

### 2.1 实例 1

本项目以某导弹发动机压力为例进行仿真实验。导弹发动机压力是衡量发动机状态的重要参数, 如果发动机压力不满足要求, 对导弹的作战使用将产生重要影响。因而, 需要及时获知发动机压力数据, 以便对发动机及时维护。以下是某型导弹发动机压力测试数据。按照指标要求, 发动机压力的正常范围区间为:  $0.65 \pm 0.01$  MPa。该型导弹发动机测试数据如表 2 所示。

表 2 导弹测试期间各级发动机压力传感器测试数据

序号	测试时间	一级发动机		二级发动机	
		M1yc1	M1yc2	M2yc1	M2yc2
1	04.28	0.650	0.646	0.650	0.650
2	05.03	0.651	0.651	0.652	0.651
3	05.15	0.650	0.650	0.650	0.651
4	06.05	0.649	0.650	0.651	0.650
5	06.07	0.650	0.650	0.653	0.650
6	06.24	0.649	0.650	0.654	0.651
7	07.22	0.649	0.650	0.655	0.650
8	08.04	0.648	0.650	0.652	0.649

由于两个传感器测试的数据反映的都是一个发动机状态, 所以, 我们只对 3 个发动机中的一个其中的设定  $r=3$ , 根据上述数据, 计算各发动机的健康度如表 3 所示。

表 3 导弹测试期间各级发动机健康度数据

序号	测试时间	一级发动机				二级发动机			
		M1yc1				M2yc1			
		$h_b$	$h_v$	$h_f$	$H$	$h_b$	$h_v$	$h_f$	$H$
1	04.28	1	1	1	1	1	1	1	1
2	05.03	1	1	1	1	1	1	1	1
3	05.15	1	1	1	1	1	1	1	1
4	06.05	1	1	1	1	1	1	1	1
5	06.07	1	1	1	1	1	0.99	1	0.99
6	06.24	1	1	1	1	1	0.98	0.99	0.97
7	07.22	1	1	1	1	1	0.97	0.99	0.96
8	08.04	1	1	1	1	1	1	1	1

分析表 2~3, 如果按照传统健康状态评估方法, 只以当前测试数据是否在正常范围内判断发动机健康状态, 则实例 1 中各个测试时间下一级发动机和二级发动机健康度均为 1, 均符合发动机压力的正常范围。但观察表 1 可知二级发动机 M2yc1 的测试数据从 5 月 15 日到 7 月 22 日一直增大, 测试数据持续向一个方向变化, 有超过阈值可能, 说明此时装备健康状态正在恶化, 而健康度仍为 1 并不合理, 无法反应装备变化状态也无法引起使用者关注。根据本文提出的方法, 利用公式 (4) 对一级发动机和二级发动机的健康度进行计算, 所得结果与实际测试值所反映的发动机状态基本一致, 符合现实使用需要, 更加直观科学反应发动机健康状态。

### 2.2 实例 2

本课题以某型导弹 II 级伺服机构油面测试为例进行仿真实验。伺服系统是某型潜射导弹姿态控制系统执行机构, 伺服液压源是伺服机构的动力源, 为了确保导弹能够完全按照弹上控制系统指令飞行, 就必须保证伺服工作液充足。这就需要对伺服工作液进行定期检测测试, 评估伺服机构的健康状态。当前, 伺服工作液的测试都是实时测试, 只要所测数据符合规定数据要求即判断合格。但是, 随着潜艇艇载值班时间、次数的增加, 伺服工作液可能出现泄漏、渗漏、挥发等故障, 一旦故障发生, 只能返回原厂维修, 将严重影响导弹值班、发射等作战任务的实施, 在历次导弹测试、训练、试验中也出现过类似故障, 影响任务顺利完成。所以如果能够根据测试数据事先预测伺服工作液状态, 为使用者提供准确的维修策略依据, 实现装备的预防性维修, 将大大提高潜射导弹的综合保障能力, 确保战备任务的顺利完成。

#### 1) 导弹伺服机构伺服液压源:

伺服液压源是伺服机构的动力源, 由燃气涡轮泵和油源组件两部分组成, 燃气涡轮泵由涡轮转子、动密封组件、转速传感器等组成, 见图 1 所示。

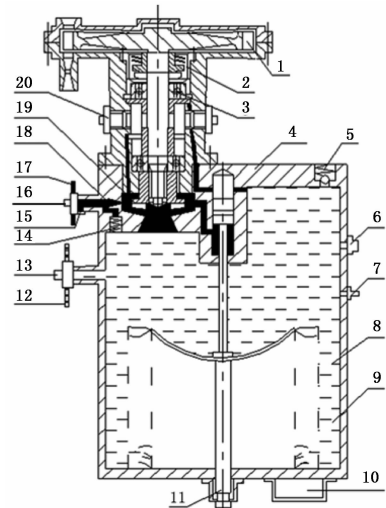


图 1 伺服液压源结构组成示意图

2) 实测数据:

某导弹伺服机构液面测试数据要求范围: [4.5, 5.0]。

历次测试数据统计如表 4 所示。

表 4 导弹测试期间伺服机构二级油面测试数据

序号	测试时间	二级油面数据
1	2014.05.05	4.940
2	2014.05.15	4.870
3	2014.06.05	4.810
4	2014.06.07	4.800
5	2014.06.24	4.780
6	2014.07.22	4.750
7	2014.08.04	4.700
8	2014.08.10	4.720
9	2014.08.24	4.740
10	2014.09.23	4.700
11	2014.10.13	4.650
12	2014.11.13	4.560
13	2014.12.10	4.510
14	2015.01.08	4.450
15	2015.01.08	4.420

根据健康度计算公式, 计算伺服机构健康度如表 5 所示。

表 5 导弹测试期间伺服机构健康度数据

序号	测试时间	二级油面数据	健康度			
			$h_b$	$h_v$	$h_f$	$H$
1	05.05	4.940	1	1	1	1
2	05.15	4.870	1	1	1	1
3	06.05	4.810	1	0.999	0.97	0.96
4	06.07	4.800	1	0.98	0.97	0.95
5	06.24	4.780	1	0.97	0.96	0.93
6	07.22	4.750	1	0.96	0.96	0.92
7	08.04	4.700	1	0.95	0.95	0.90
8	08.10	4.720	1	1	1	1
9	08.24	4.740	1	1	1	1
10	09.23	4.700	1	1	1	1
11	10.13	4.650	1	0.99	0.98	0.97
12	11.13	4.560	1	0.98	0.96	0.94
13	12.10	4.510	1	0.97	0.95	0.925
14	01.08	4.450	0	—	—	0
15	01.08	4.420	0	—	—	0

分析表 3 表 4, 如果按照传统健康状态评估方法, 只以当前测试数据是否在正常范围内判断发动机健康状态, 则

实例 2 中除 2015 年 1 月 8 日外各个测试时间下伺服机构健康度均为 1, 均符合伺服机构液面测试数据要求范围。但观察表 3 可知伺服机构二级油面测试数据从 2014 年 8 月 24 日到 2015 年 1 月 8 日一直减小, 测试数据持续向一个方向变化, 最终超过阈值, 装备出现故障, 在此变化过程中, 传统健康度评估方法无法反映变化趋势, 提醒使用者装备即将可能故障, 使用者也无法及时对装备进行维修, 直至装备出现故障, 造成严重影响。根据本文提出的方法, 利用公式 (4) 对伺服机构的健康度进行计算, 当装备健康状态出现恶化趋势时即可提醒使用者采取维修措施, 避免装备彻底故障停机, 更加符合基于状态的维修要求, 提高装备利用率, 确保任务完成率。

3 结束语

装备健康状态评估是 PHM 技术的一项重要功能, 良好的健康状态是装备保持和发挥战斗力的重要保证, 确定潜在故障发生时刻和定位故障位置也为维修决策提供依据, 确保装备可以在较短时间内恢复性能, 保证任务的顺利完成。针对当前装备健康状态评估方法无法反映健康状态变化过程的问题, 本文提出了一种新型的基于测试数据的装备健康状态评估方法, 重点关注测试数据的动态变化过程对装备健康度的影响, 得到了健康度变化状态下的装备健康状态评估的方法。通过某型潜射导弹装备实例分析表明, 该方法更符合现实需要, 能更加准确评估装备健康状态, 为使用者维修决策提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 周林, 赵杰, 冯广飞. 装备故障预测与健康管理工作 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [2] 宋飞, 秦世引. 卫星姿态控制系统在轨实时健康评估 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (11): 1581-1587.
- [3] 邓伟锋, 李振璧. 基于 GA 优化 BP 神经网络的微电网蓄电池健康状态评估 [J]. 电测与仪表, 2018, 55 (21): 56-60.
- [4] 赵文清, 朱永利, 姜波. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估 [J]. 高压电技术, 2008, 34 (5): 1032-1039.
- [5] 吴明辉, 许爱强, 邓力, 赵秀丽. 基于免疫遗传和顺序支持向量分类机的 DTG 健康状态评估 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34 (10): 1064-1068.
- [6] 刘志宇, 黄亦翔. 基于深度学习和迁移学习的液压泵健康评估方法 [J]. 机械与电子, 2018, 36 (9): 67-71.
- [7] 王亮, 吕卫民, 滕克难. 基于测试数据的长期贮存装备实时健康状态评估 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (6): 1212-1217.
- [8] 张明锐, 龚晓冬, 李启峰. 基于故障树的城市轨道交通牵引供电接触网可靠性分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18 (3): 6-12.