

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.006

## 基于寿命老化模型的舵板寿命预测

朱长波, 赵修平, 边晓阳, 李显龙

(海军航空大学研究生 4 队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为预测舵板的使用寿命特性, 建立舵板寿命老化模型。分析寿命老化模型理论依据, 建立寿命老化模型, 对舵板寿命进行预测, 利用加速因子的不变原则, 推导出寿命估计模型的参数在不同应力下的变化规律, 并进行仿真分析。仿真结果表明: 加速因子不变原则能够预测舵板在不同环境应力下的使用寿命, 且相较于一般神经网络, 其稳定性更强, 为舵板寿命评估提供了有效的参考。

**关键词:** 舵板; 寿命老化模型; 加速因子; 寿命预测

**中图分类号:** TJ765.4 **文献标志码:** A

## Life Predict of Rudder Based on Life Aging Model

Zhu Changbo, Zhao Xiuping, Bian Xiaoyang, Li Xianlong

(No. 4 Brigade of Grandate Student, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to predicting the life characteristics of the rudder, the life aging model of the rudder has been built. The life aging model theory basis has been analyzed, the life aging model of the rudder has been built, based on which, the life of the rudder was predicted, and the acceleration factor constant principle was introduced to deduce the relationships between model parameters on different stresses, by which the simulation was built. The simulation result showed that the acceleration factor constant principle could be used to predicted the life of the rudder under different environment stresses, and compared with the general neural network, the former has stronger stability, which provided a useful reference for the life assessment of the rudder.

**Keywords:** rudder; life aging model; acceleration factor; life prediction

### 0 引言

某水下航行体的舵板是为了确保水下航行体与潜艇的安全而额外增加的机构, 舵板是能确保水下航行体发射安全的关键重要一环<sup>[1-4]</sup>。

鉴于舵板的关键重要性, 以及其易于损坏等特点, 有必要对其展开寿命预测。

舵板的寿命较短是由于水下航行体出水时, 舵板会受到一系列低周大冲击的作用, 这一系列的冲击作用将持续到舵板张开至一定的角度直至卡死。不规则、间歇时间短、作用力大的冲击将大大缩短舵板的寿命。

舵板的使用寿命从一般意义上讲, 其影响因素分为 2 个方面, 即储藏环境因素和使用环境因素。储藏环境因素为温度、湿度、辐射等, 使用环境因素为出筒速度、水深等。其损坏主要形式为疲劳断裂。

目前, 在对疲劳寿命的相关预测方法中, 主要有局部应力应变法和名义应力法、场强法和能量法等方法。但这几种解算过程较为繁杂, 且需要较高的实验条件为基础。

笔者采用性能老化模型<sup>[5]</sup>, 作出舵板的寿命老化曲线图, 以统计学规律为其解算基础, 预测舵板在不同环境应力下的使用寿命。

### 1 舵板的形态及功能

图 1 是航行体的横截面, 中间的圆柱体为航行体的截面, 在航行体一侧分布的是 5 块舵板, 即图中右侧突起的 5 个部位。未发射时, 舵板紧紧贴在航行体的壁上。当某水下航行体以某一初始速度出筒后, 原本贴合在航行体壁上的舵板受水流冲击, 自然张开至一定的角度, 如图 2 所示。圆柱体为航行体壁的侧面图, 左侧部分即为受水流冲击而张开的舵板结构。为了易于理解展示, 可等效看作只有其左侧的一个舵板随着训练弹的出水, 水流会给右侧的舵板一个冲击力, 左侧舵板受力后, 带动舵板向左侧偏斜, 通过适当地控制舵板的位置和大小, 即可控制水下航行体的出水轨迹, 以确保其出水再落水后不至于砸艇(作用)。实验结果表明: 没有舵板结构时, 存在极大的回落砸艇危险, 而增加舵板结构后, 使得这一危险得以消除, 所以舵板是能确保水下航行体发射安全的关键重要一环<sup>[1-4]</sup>。

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-04-04

作者简介: 朱长波(1994—), 男, 湖北人, 硕士, 从事兵器科学与技术研究。

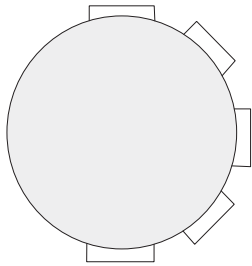


图 1 某水下航行体截面图

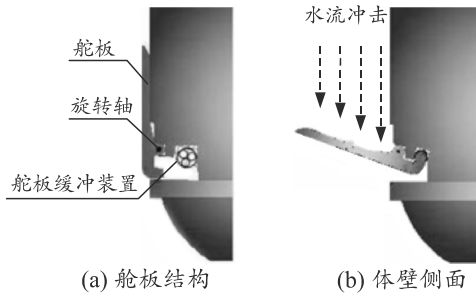


图 2 舵板张开过程

## 2 寿命老化模型理论依据

### 2.1 相关寿命指标

根据概率论中所述，结合舵板寿命预测实际，舵板寿命总体是指同一型号同一批次的所有舵板，而每个具体的舵板便是其个体。由于舵板在生产过程中会不可避免地存在某些差异，造成个体之间的寿命值并不相同，而为服从某种分布模型的随机变量。评价某批舵板的可靠性或寿命特性时，依据的是舵板总体的寿命指标，然而对所有个体进行寿命预测并不现实，工程中一般采用随机抽样试验的方式，通过概率统计拟合出总体的寿命指标，包括可靠寿命、中位寿命、平均寿命等。

可靠寿命是针对某一可靠度而言，是指产品到达这一可靠度水平时所对应的工作或储藏的时间。对产品来说，可靠寿命的获取需求出其相应的可靠度函数  $R(t)$ 。在一般意义下，忽略维修等活动的影响， $R(t)$  在  $t$  的时间域上为一个单调减函数，产品的可靠度  $R$  与其可靠寿命具有如图 3 所示的对应关系。

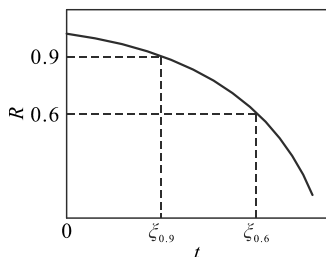


图 3 可靠度  $R$  与可靠寿命  $\xi_R$  的对应关系

可靠度为无量纲，横坐标为时间，其单位具体

因不同的产品而变化，可能是秒、分、年等。

中位寿命是指产品的可靠度取其中值即 0.5 时所对应的时间，这个时候有一半的产品发生了失效。而产品的平均寿命是指产品寿命的概率密度的期望值，以  $f(t)$  表示产品寿命的概率密度， $\bar{\xi}$  表示产品的平均寿命，有如下的计算公式：

$$\bar{\xi} = E(\xi) = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (1)$$

可靠寿命在以上 3 个具有代表意义的寿命指标中尤为重要，且其应用也较普遍。例如，某一产品为某一装备的关键部件，则对产品的可靠度要求更为严格，如 99.9% 的可靠度；因此，在产品的维修方案中，在产品的可靠度下降至 99.9% 时，便应当维修或更换。

### 2.2 产品寿命与环境应力

产品失效快慢的决定因素为 2 个方面，即产品的工作强度和 产品所在的外部环境。工作强度是指产品的工作频次、工作负载(即电流、电压、功率)及其工作时间等；而外部环境因素是指辐射、湿度、温度、振动等<sup>[6]</sup>。这些都可称之为影响产品寿命的外部因素，在广义上可称之为环境应力。基于产品的寿命与其环境应力之间的密切关系，有必要根据产品的实际外部环境来评估产品的寿命。

如果在不同的环境条件下，产品的失效形式具有相似性、相通性，即产品的失效机理具有一致性，那么在不同的环境条件下，产品的寿命指标就可以进行相应的折算，折算的关键便是获得相应的折算因子，而这一折算因子在加速度实验中，又称之为加速度系数或加速度因子，如果能推导出在不同环境应力下的加速度因子，就可以根据各个实际情况中的环境应力来推断产品的寿命。

## 3 寿命老化模型的建立

### 3.1 模型参数估计

仅凭个体在额定应力下的少量性能老化数据无法准确估计出模型参数值，然而加速老化试验提供了大量的产品老化先验信息<sup>[7]</sup>。

为使参数估计更加可靠，现将通过老化试验获得的加速度老化数据作为模型参数的先验信息，将在特定应力下的少量舵板产品老化数据作为现场信息，舵板个体在制造过程中由于制造误差不可避免地会存在一些差异，从而造成其老化轨迹具有一定差异，即相关模型的参数具有随机性。

### 3.2 性能老化建模

在建模之前,笔者假设  $t_{ijk}$  为第  $i$  次测量的时间,其中: $j$  为第  $j$  个舵板, $k$  为第  $k$  个加速度应力; $y(t_{ijk})$  为相应的应变变量,为老化增量的测量值,可以得出  $y(0)=0$ , 则产品的老化轨迹函数为

$$y(t_{ijk}) = g(t_{ijk}, \theta) + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

其中: $g(t_{ijk}, \theta)$  为舵板产品老化增量的真实值;参数  $\theta$  表示未知的参数向量; $\varepsilon_{ijk}$  为相应的测量误差,显然地服从正态分布,即  $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_{jk}^2)$ 。

在产品的老化轨迹中,普遍的有直线型、指数型和幂律型<sup>[7]</sup>等几种。直线型为指数型和幂律型的特殊情况。为了不失其一般情况,笔者将老化函数设为如下形式:

$$g(t_{ijk}; \theta) = g(t_{ijk}; a, b) = at_{ijk}^b \quad (3)$$

式中, $a, b$  为未知的参数,  $\theta = (a, b)$ 。这样对于每一个舵板就可以由它的测量值  $(y_{jk}, t_{jk})$ , 求出舵板老化轨迹函数的  $\theta$  估计值  $\hat{\theta}_{jk}$ 。由  $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_{jk}^2)$  可以得到  $[y_{ijk} - g(t_{ijk}, \theta)] \sim N(0, \sigma_{jk}^2)$ , 即可运用最大似然估计求出每块舵板的  $\hat{\theta}_{jk}$ , 有如下关系式:

$$L(a_{jk}, b_{jk}, \sigma_{jk}) = \prod_{i=1}^{n_{jk}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{jk}^2}} \exp\left[-\frac{(y_{ijk} - a_{jk}t_{ijk}^{b_{jk}})^2}{2\sigma_{jk}^2}\right] \quad (4)$$

由上式可以求出估计量  $\hat{\theta}_{jk}$ , 再由设定的寿命失效值  $D$ , 即可估算出每块舵板产品的寿命  $\xi_{jk}$ 。

这样就可以通过最优拟合检验确定舵板在不同应力下寿命值所要服从的最佳分布模型。由于舵板在不同加速应力下的分布模型有可能会不同,使得指派的模型准确性不高。笔者研究了由加速度因子不变性进行参数折算,以确定在不同环境应力下的舵板寿命分布模型。

### 3.3 参数的加速模型

产品在不同的环境应力下,仍然会服从相同的性能老化模型,不同的仅仅是老化模型里的相关参数,而在老化模型中,参数  $a$  决定函数的幅值,是可以改变的,参数  $b$  决定着函数的形状,应该保持不变。现假设加速应力为功率  $W$ , 以 Arrhenius 方程<sup>[5]</sup>作为产品的加速模型,则有

$$a(W) = \exp(\gamma_1 - \gamma_2 / W), \quad b(W) = b \quad (5)$$

式中的  $\gamma_1, \gamma_2$  为未知待定系数。

在 Pieruschka 假定中指出了产品寿命分布的相

关参数在加速应力下会发生相应的改变,却没说明参数会以怎样的方式变化。周源泉提出了加速因子的不变原则<sup>[8]</sup>, 并且在不变原则的基础上列出了推导寿命分布模型的相关参数在不同应力下所应满足关系的方法。该原则是指为了保证加速因子具备工程应用性,要求加速因子是一个不会随时间而变化的常数,仅由加速应力环境来决定。周源泉等利用加速因子的不变原则,推导了 19 种关于寿命分布模型的相关参数在不同应力环境下所满足的关系式<sup>[9]</sup>, 其中大部分推导结论已被试验结果所验证。

将加速因子的不变原则应用到加速老化试验中,来推导出老化轨迹函数的相关参数在加速应力下会怎样变化<sup>[10]</sup>, 并验证式(5)中的 2 个关系式。加速因子在加速老化试验中的定义为:当产品在不同应力水平下具有相等的平均老化量  $d$  时,则其老化时间的比值即为应力水平之间的加速因子

$$AF_{k,h} = t_{d,h} / t_{d,k} \quad (6)$$

式中: $AF_{k,h}$  为功率应力  $W_k$  相对于功率  $W_h$  应力的加速因子; $t_{d,k}, t_{d,h}$  为舵板产品在应力  $W_k, W_h$  下的平均老化量达到  $d$  时所对应的时间。以  $g_k(t; a_k, b_k)$  和  $g_h(t; a_h, b_h)$  表示其平均老化量,当平均老化量都为  $d$  时,可得

$$d = a_k (t_{d,k})^{b_k} = a_h (t_{d,h})^{b_h} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 可得

$$AF_{k,h} = \left(\frac{d}{a_h}\right)^{\frac{1}{b_h}} / \left(\frac{d}{a_k}\right)^{\frac{1}{b_k}} \quad (8)$$

现要保证  $AF_{k,h}$  为与平均老化量  $d$  无关的常数,则需要满足如下关系式

$$b_k = b_h, \quad a_k / a_h = (AF_{k,h})^{1/b_k} \quad (9)$$

由上式可得,参数  $b$  不随环境应力的改变而变化,参数  $a$  与加速应力有关,反映的是产品在不同应力水平下的寿命老化曲线的斜率,即式(5)得到验证。

## 4 舵板寿命预测

在舵板的实际使用过程中,造成舵板寿命个体差异的主要环境变量为承受的发射速度与储藏时的环境温度。现以发射速度为加速度因子,选取 2 组舵板数据作为对比数据以验证加速因子的不变性,如图 4、图 5,进而得出舵板寿命的预测,如图 6。由于可靠度与舵板失效值的和值为 1。即当可靠度小于 99.9% 或失效值大于 0.1% 时,舵板报废,为便于图形分析,现将失效值归一化为其老化值。

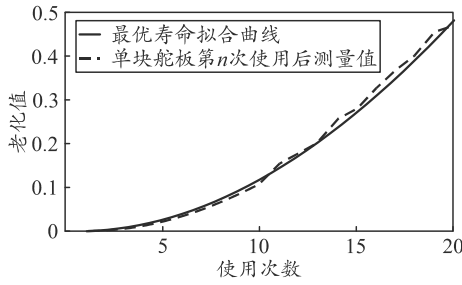


图 4 温度为 25°、速度为 27m/s 时老化

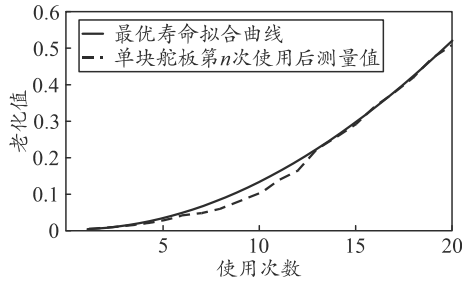


图 5 温度为 25°、速度为 30 m/s 时老化

图 4 经仿真后解算出  $b$  的值为 1.986, 图 5 经仿真后解算出  $b$  的值为 1.989, 验证了式(9), 即验证了加速因子的不变原理。

由加速因子不变原理, 将图 4、图 5 仿真后的相应参数值, 即可预测出在温度为 25°、速度为 33 m/s 时老化图, 如图 6 所示。

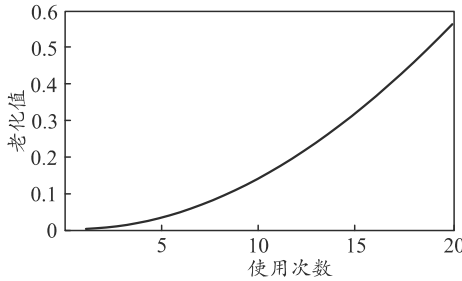


图 6 温度为 25°、速度为 33m/s 时老化

而由图 4、图 5 和图 6 可以看出: 在相同的环境温度下, 不同的初始速度老化寿命曲线有明显的差异, 初始速度越大, 其老化速度也显著加快。

神经网络常运用于对产品寿命的预测中<sup>[11]</sup>, 运用神经网络对舵板在温度为 25°、速度为 33 m/s 时的工况下进行预测, 预测结果如图 7、图 8。

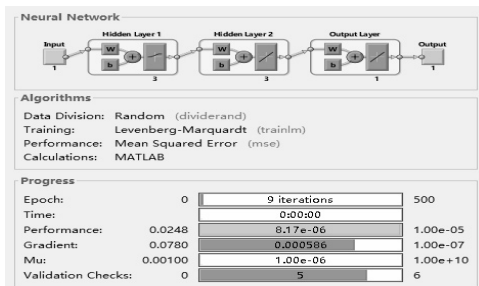


图 7 神经网络的结构及参数设定

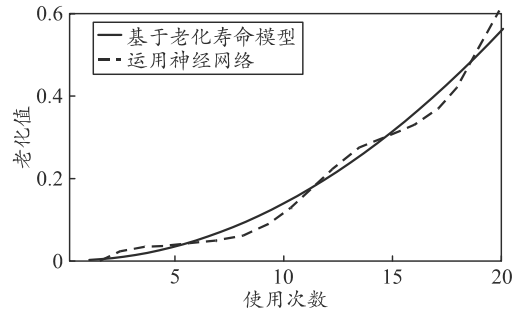


图 8 温度为 25°、速度为 33 m/s 的神经网络预测

由图 8 可知: 运用 2 种不同方法对舵板寿命的预测变化趋势大体一致, 然而神经网络的预测曲线起伏变化更为显著, 因而会产生较大的误差, 由此得出老化寿命模型更具有稳定性。

### 5 结束语

笔者通过建立寿命老化模型, 并由在不同应力下的加速因子不变性, 推导出了相关参数的变化规律, 通过仿真使得这一变化规律得到了进一步的验证, 并预测出舵板在改变加速因子后的寿命变化曲线图, 为实际的舵板寿命评估提供了有效的参考。

### 参考文献:

- [1] 张阿漫, 戴绍仕. 流固耦合动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 2-3.
- [2] 宋学官, 蔡林, 张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 5-9.
- [3] 周俊杰, 徐国权, 张华俊. FLUENT 工程技术与实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 8-13.
- [4] 张川, 郭楠. 超大变形应变测量方法的研究[J]. 中国测试, 2014, 40(s1): 90-93.
- [5] 周源泉. 可靠性工程的若干方向[J]. 强度与环境, 2005, 32(3): 33-38.
- [6] 王浩伟, 徐廷学, 张晗. 基于退化量分布的某型电连接器寿命预测方法[J]. 现代防御技术, 2014, 42(5): 134-139.
- [7] 陈循. 加速试验技术的研究、应用与发展[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 130-136.
- [8] PIERUSCHKA E. Relation Between Lifetime Distribution and the Stress Level Causing Failure [S]. LMSD-400800, Lockheed Missile and Space Division, Sunnyvale, California: 1961.
- [9] 周源泉, 翁朝曦. Gamma 分布环境因子的统计推断[J]. 系统工程与电子技术, 1995(12): 61-71.
- [10] 蔡丽萍, 张斌, 章有良, 等. 电动汽车驱动电机轴承性能可靠性试验研究[J]. 机电工程, 2017, 34(5): 478-482.
- [11] 范高锋, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于人工神经网络的风电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118-123.