

基于实艇装载与加速试验的鱼雷装载可靠度综合评估

朱文振, 刘清慧, 唐世轩

(中国人民解放军 91388 部队 92 分队, 广东 湛江 524022)

摘要: 针对潜载鱼雷装载可靠度试验时间长、样雷数量小、验前信息少等问题, 通过分析装载可靠性评估方法优缺点、装载可靠度试验鉴定主要问题, 提出了实艇装载与实验室加速相结合的装载可靠度综合评估方法; 结合加速试验等效原理, 分析了影响鱼雷装载环境应力的主要因素, 设计了装载可靠度试验总体方案和加速试验剖面, 确定了恒温、温变循环、振动疲劳加速模型的试验工程化参数; 算例表明, 该方法解决了在较短时间内潜载鱼雷装载可靠度试验考核问题, 在保证试验评估结论可信的同时可大幅提高试验实效, 不仅可推广应用于其他类型鱼雷可靠性试验鉴定, 还可指导鱼雷可靠性的研制与设计。

关键词: 潜载鱼雷; 装载可靠度; 实艇装载; 加速试验; 综合评估

Comprehensive Evaluation of Torpedo Loading Reliability Based on Submarine Loading and Accelerating Test

ZHU Wenzhen, LIU Qinghui, TANG Shixuan

(Unit 92, PLA91388, Zhanjiang 524022, China)

Abstract: Aiming at the problems of long loading time, small test samples and lack pre-test information for submarine torpedo loading reliability, by analyzing the advantages and disadvantages of loading reliability evaluation methods and main problems of loading reliability test, a comprehensive evaluation method of torpedo loading reliability based on submarine loading and laboratory acceleration is proposed. Combined with the equivalent principle of accelerated test, the main affecting factors for loading environment stress are analyzed, the overall scheme and acceleration profile of loading reliability test are designed, the experimental parameters of constant temperature, temperature vibration cycle and vibration fatigue acceleration model are determined. The example shows that, this method solves the problem of reliability test and evaluation of submarine torpedo in a short time, it can greatly improve the quality and efficiency of test while ensuring the credibility of test evaluation conclusion, it can not only be applied to the test evaluation of other types of torpedo, but also guide the development and design of torpedo.

Keywords: submarine torpedo; loading reliability; submarine loading; accelerating test; comprehensive evaluation

0 引言

装载可靠度是鱼雷可靠性的一项重要指标, 鱼雷在发射前需在潜艇上经历长时间的装载任务, 虽然在装载状态下鱼雷非工作失效率也远远小于工作失效率, 但由于装载时间远远大于其工作时间, 装载环境对鱼雷可靠性的影响不可忽视, 因此, 如何正确评估全雷装载可靠度对于装备战斗力生成具有重要意义。

经典可靠性评估方法具有试验时间长、样雷数多、客观真实等特点, 广泛应用于鱼雷可靠性鉴定试验。装载可靠度试验经历了经典方法、Bayes 方法、加速试验方法, 解决了武器装备装载可靠性试验综合评估技术难题。随着鱼雷可靠性水平的不断提高, 现代鱼雷装载时间要求越来越

长, 单纯采用一种可靠性评估方法难以在较短时间内完成全雷装载试验鉴定任务^[1-3]。装备可靠性鉴定试验可通过等效模拟环境应力作用效果的加速试验, 加速产品故障进程, 可有效缩短试验时间, 弥补实际装载获取装载可靠性信息的不足, 已成为武器装备可靠性试验鉴定常用的评估方法^[4-6]。本文结合装载可靠度各种方法的优点和局限性, 提出一种基于实艇装载与加速试验相结合的鱼雷装载可靠度综合评估方法, 为解决鱼雷可靠性试验鉴定工程问题提供技术途径。

1 常用装载可靠度评估方法

1.1 典型样本装载评估方法

在满足使用方和研制方风险条件下, 采用二项分布检

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2023-01-10。

作者简介: 朱文振(1975-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 朱文振, 刘清慧, 唐世轩. 基于实艇装载与加速试验的鱼雷装载可靠度综合评估[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 305-309.

验方法设计装载试验方案,按照装载任务剖面和指标时间要求,在作战舰艇上装载鱼雷,统计发生责任故障数量,计算装载可靠度置信下限^[7]。该方法优点满足双方风险时,试验结果准确,统计结果具有很高的置信度;缺点是鱼雷数量较多,装载时间较长,对保障鱼雷装载的作战平台资源要求较高,难以满足试验鉴定要求。

1.2 典型时间装载评估方法

采用指数分布将鱼雷装载可靠度指标转换为平均故障间隔时间(MTBF)指标,按照装载任务剖面和试验时间要求,在作战舰艇上装载鱼雷,统计发生责任故障的数量,计算装载可靠度置信下限^[8]。该方法优点是统计数据准确,能够反映鱼雷实际装载可靠性;缺点是当装载可靠性指标要求较高时,试验要求鱼雷数量多,装载时间长,用于舰艇装载保障难度大,无法满足试验鉴定需求。MTBF转换的方式为:

$$MTBF = -\frac{t_0}{\ln(R_L)} \quad (1)$$

式中, t_0 为鱼雷装载时间指标, R_L 为鱼雷装载可靠度最低可接受值指标。

1.3 实验室装载评估方法

将鱼雷装载可靠度指标转换为MTBF指标,采用定时截尾检验方案,按照装载任务剖面和试验时间要求,在实验室模拟鱼雷装载综合应力环境条件下对全雷进行试验,统计发生责任故障数量,计算装载可靠度置信下限^[8]。该方法优点是实验室模拟环境条件可控,不需要作战平台保障资源;缺点是若装载可靠性指标要求较高,当鱼雷数量较少时装载试验过长,当鱼雷数量较多时装载试验较长。

1.4 基于 Bayes 装载评估方法

Bayes理论是将统计模型中的参数作为随机变量,利用各类先验信息确定这些参数的先验分布,由Bayes定理将先验信息和实艇装载可靠性试验数据综合得到参数的后验分布,从而对参数进行评估和检验^[3]。该方法优点是可以利用先验信息进行统计评估,要求实际装载试验信息可相应减少,特别是若能够提供足够客观的先验信息时,试验结果比较客观;缺点是对验前的信息量要求较大,才能保证装载试验评估的客观性。

1.5 实验室加速装载评估方法

将鱼雷装载可靠度指标转换为MTBF指标,根据加速试验的原理,在实验室模拟增大鱼雷装载环境应力量值,统计发生责任故障数量,计算装载可靠度置信下限。该方法优点是实验室模拟环境条件可控,可大幅减少鱼雷样数或缩短装载试验时间;缺点是加速系数与加速模型运用、加速试验环境选择、装载实际环境应力数据获取等密切相关,加速系数大小难以准确估计。

2 实艇装载与加速试验相结合评估方法

2.1 装载可靠度鉴定试验主要问题

随着鱼雷可靠性水平的不断提高,现代鱼雷装载可靠

度具有指标要求高、装载时间长等特点,受装备研制进度、鱼雷样雷数量、试验保障资源等条件限制,装载可靠度综合评估需求与试验鉴定现实条件存在突出矛盾,主要表现为:一是典型样本装载评估方法是通过舰艇装载规定鱼雷数量进行试验,符合鱼雷装载使用环境条件,试验结果可信度很高,受鱼雷样雷数量、潜艇保障资源等条件限制,难以保障多鱼雷、长时间的实艇装载任务。二是经典时间装载评估方法是通过舰艇或实验室装载鱼雷规定时间进行试验,符合或近似鱼雷装载使用环境条件,试验结果可信度较高,鱼雷样雷数量偏少时所需试验时间长,难以在较短时间内完成装载可靠度试验任务。三是基于Bayes装载评估方法需要大量验前信息,受鱼雷技术状态难以固化、实艇装载数据不多等影响,验前信息难以有效支撑装载可靠度综合评估。四是实验室加速试验可大幅缩短装载可靠性试验时间,受试验安全因素影响,鱼雷通常不能配置火工品进行加速试验,需要实艇装载试验信息进行有效补充。

2.2 基于实艇装载与加速试验相结合方法

2.2.1 装载可靠度近似指数分布

现代鱼雷系统、组部件绝大部分是电子产品,剔除了早期故障进入偶然故障期后,电子产品其失效率为常数,服从指数分布。鱼雷机械、机电产品寿命服从威布尔分布,剔除早期故障后进入正常工作期,在未进入损耗故障期前,故障率上升很缓慢,近似服从指数分布。鱼雷有少量一次性使用的机械、橡胶产品,其寿命无法用指数分布描述,但这些部件属于定期维护的可更换件,不影响鱼雷总体可靠性按指数分布去考虑。因此,鱼雷系统、组件、零部件寿命分布类型有所不同,但研究鱼雷全雷装载可靠性问题时,仍可按近似指数分布模型进行处理。

2.2.2 基于实艇装载与加速试验相结合方法

针对鱼雷装载可靠度试验鉴定所需装载时间长、鱼雷数量多、验前信息少等客观条件,采用指数分布模型将鱼雷装载可靠度指标转换为MTBF指标,根据潜艇保障条件合理确定艇上装载试验方案,在实验室开展加速装载试验增加鱼雷装载可靠性信息,综合运用艇上实际装载试验信息和鱼雷加速装载试验信息,对鱼雷装载可靠度进行综合评估。

2.3 加速试验方法

2.3.1 加速试验基本原理

根据加速试验的原理,当环境应力量值增加后,相应的试验时间可以缩短,使对产品的失效率影响保持相当,因此,利用加严的综合环境应力剖面进行可靠性试验,可以在较短的时间内达到被试产品可靠性考核目的。加速试验基本原则是采用环境应力对产品缺陷的激发效能相等效进行加速,即加速后的环境应力剖面与加速前的环境应力剖面对产品的失效率的影响是等效的,从而在不同的应力水平下确保产品的失效机理保持不变^[9-11]。

2.3.2 装载环境应力分析

鱼雷装载期间主要经历温度、湿度、盐雾、霉菌、振动等各种环境因素的作用, 由于鱼雷具有良好的密封性, 湿度对鱼雷装载可靠性影响较小, 盐雾、霉菌在装载试验前已通过专项环境鉴定试验。为此, 温度、振动两种应力是鱼雷及其组部件在长时间装载条件下产生累积损伤的主要影响因素, 装载可靠度实验室加速试验主要采用温度、振动典型环境应力, 对鱼雷电子产品以及所属机械、机电产品和非金属材料进行考核^[12]。

2.4 加速试验模型

2.4.1 恒温加速模型

高温可以加快构成产品的原子或分子发生物理或化学反应, 促使产品提前失效。产品性能退化速率与激活能的指数成反比, 当温度应力加大时, 产品内部分子动能的增加导致材料膨胀, 其化学特性和物理特性发生变化, 从而导致产品退化速度加快, 使用寿命缩短^[13-14]。因此, 可通过升温和降温的方式增大温差, 从而缩短鱼雷装载试验所需时间。

当温度作为加速应力时, 加速试验通常采用 Arrhenius 模型:

$$\rho(T) = Ae^{-E_a/KT} \quad (2)$$

式中, $\rho(T)$ 为反应速率, 是绝对温度的函数; A 为与温度无关的常量; E_a 为激活能, 以 eV 为单位; K 为波尔兹曼常数, $8.617\ 358 \times 10^{-5}$ eV/K; T 为绝对温度。

对于服从指数分布的鱼雷来说, 其失效率与反应速率成正比, 温度加速因子 A_F 模型:

$$A_F = \exp\left(\frac{E_a}{K}\left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_l}\right)\right) \quad (3)$$

式中, T_u 为额定条件下的绝对温度, T_l 为加速条件下的绝对温度。对于有较多集成电路的鱼雷装备, E_a 可选用 0.9 eV。

2.4.2 温度循环加速模型

温度循环是造成产品耗损型故障的主要因素, 使材料发生低周疲劳、接触材料的脱离等。在不工作状态下, 温度变化造成的系统耗损型故障模式主要体现在元器件的引脚或内部引线断开、焊盘松脱、胶合松脱、材料疲劳损伤等。温度循环与高低温的温差有关, 温差增大会加快系统耗损型故障的发生^[15-17]。因此, 可通过升温和降温的方式增大温差, 从而缩短鱼雷装载试验所需时间。

描述热疲劳失效与温度循环应力的关系可采用 Coffin-Manson 模型:

$$N = \left(\frac{\delta}{(\Delta T)^{\beta_1}}\right) \left(\frac{1}{f^{\beta_2}}\right) \exp\left(-\frac{E_a}{KT_{max}}\right) \quad (4)$$

式中, N 为热循环次数, ΔT 为温变范围; f 为热循环频率, T_{max} 为最高绝对温度, δ, β_1, β_2 为材料参数。

综合考虑温变范围、温变率、最高温度等因素, 描述温度循环对产品的影响可采用 Norris-Landzberg 模型:

$$\frac{N_l}{N_u} = \left(\frac{\Delta T_l}{\Delta T_u}\right)^{1.9} \left(\frac{\Delta f_u}{\Delta f_l}\right)^{1/3} \exp\left(\frac{T_{rmax} - T_{umax}}{100}\right) \quad (5)$$

式中, N_l 为加速条件下的热循环次数, N_u 为额定条件下的热循环次数; ΔT_l 为加速条件下的热循环绝对温度差, ΔT_u 为额定条件下的热循环绝对温度差; Δf_l 为加速条件下的热循环频率, Δf_u 为额定条件下的热循环频率; T_{rmax} 为加速条件下的热循环中最高绝对温度, T_{umax} 为额定条件下的热循环中最高绝对温度。

2.4.3 振动疲劳加速模型

振动应力对产品的可靠性影响主要是导致耗损型的故障, 材料经过若干次循环之后会发生断裂。在不工作状态下, 振动造成的系统耗损型故障模式主要体现为元器件引脚或内部引线断开、焊盘松脱、胶合松脱、结构材料疲劳断裂等。鱼雷潜艇装载属于随机振动, 振动量值是总均方根值, 提高振动量值会加快系统耗损型故障发生^[18]。因此, 可通过增大输入的振动量值的方式, 从而缩短鱼雷装载试验所需时间。

振动会造成材料的高周疲劳损伤, 描述材料经受的振动量值和振动时间之间的关系可采用 Miner 法则, 振动应力加速模型为:

$$\frac{t_l}{t_u} = \left(\frac{W_l}{W_u}\right)^m \quad (6)$$

式中, t_l 为加速条件下的振动时间; t_u 为额定条件下的振动时间; W_l 为加速条件下的均方根值; W_u 为额定条件下的均方根值; m 为材料常数, 对于随机振动, 取 4。

3 装载可靠度试验方案设计

3.1 装载平均故障间隔时间

根据鱼雷装载时间、最低可接受值指标, 将装载可靠度指标转换为最低可接受的 MTBF 指标, 选择 GJB 899A-2009《可靠性鉴定和验收试验》中的定时截尾试验方案 20-1、20-2, 由式 (1) 计算装载可靠度定时截尾试验方案, 装载故障数很小时的试验方案如表 1 所示。

表 1 定时截尾试验方案

方案/ <i>i</i>	最低可接受值/ R_L	装载时间/ y	故障数/ r	倍数/ θ	试验时间/h	
1	0.8	1	0	1.61	63 204	
2		2			126 408	
3		1	1		117 379	
4		2			234 758	
5	0.9	1	0	1.61	133 860	
6		2			267 720	
7		1	1		2.99	248 597
8		2				497 195

由表 1 可知, 与无故障装载可靠度试验时间相比, 1 个故障所需装载试验时间增加近一倍, 综合鱼雷研制进度、试验费用、保障条件等因素, 在选择装载可靠度试验方案时, 可尽量选择无故障方案。

3.2 装载可靠度试验方案

按照潜艇装载鱼雷时间尽量长、数量尽可能多的基本

原则^[19]，通常需满足实际装载不小于 1 条鱼雷、装载时间不小于指标的要求，以表 1 中试验方案 1 为例，确定装载可靠度试验方案如表 2 所示。

表 2 装载可靠度试验方案

方案/ <i>i</i>	故障数/ <i>r</i>	艇上时间及雷数/(<i>h</i> , <i>n</i>)	加速等效时间/ <i>h</i>
1	0	(8 760,1)	54 444
2		(8 670,2)	45 684
3		(8 760,3)	36 924
4		(8 670,4)	28 164

由表 2 可知，若考虑到可用于装载试验的鱼雷数量不多的实际情况，优先选用实艇装载鱼雷 2 条或 3 条方案。

3.3 加速试验剖面设计

加速试验剖面设计主要包括加速应力种类和加速应力水平。在保证被试品主要故障模式和故障机理不发生变化的情况下，尽量选取高的加速应力，以缩短试验时间，提高试验的费效比。

3.3.1 高温加速应力

根据公式 (3) 温度加速模型可知，选择加速试验温度越高，试验时间越短。为避免加速试验改变被试品的失效机理，但高温不宜过高，假设选用加速试验高温为 60 °C。

3.3.2 温差和温度变化率

由公式 (5) 温度循环加速模型可知，选择加速试验温度循环中的温差和温变率越大，循环次数越少。为避免加速试验改变被试品的失效机理，低温不宜过低，温差和温变率不宜过大。假设选用加速试验低温为 0 °C，则温差为 60 °C，温变率通常选用实验室最大值为 5 °C/min^[20]。

3.3.3 振动加速应力

鱼雷装载期间，假设潜艇航行时振动量值为 0.20 Grms，抛锚停泊时振动的量值为 0.10 Grms，潜艇停泊时间约为潜艇航行时间的三倍。实验室内的振动量值不超过能承受的环境功能振动试验量值的一半，取值 0.5 Grms。

4 装载可靠度综合评估

4.1 装载可靠度数据来源

在潜载鱼雷性能鉴定试验中，产生装载可靠度信息主要包括战雷实艇装载和全雷加速试验两类数据。

4.1.1 战雷实艇装载数据

战雷实艇装载试验能够反映装载可靠度实际状态，根据潜艇能够保障装载鱼雷数量和装载鱼雷时间的客观条件，在性能鉴定试验前期开展战雷实艇装载试验，记实艇装载试验数据 (T_1, r_1)，其中 T_1 为鱼雷潜艇装载试验总时间， r_1 为鱼雷潜艇装载试验故障数。

4.1.2 全雷加速试验数据

加速试验信息是开展装载可靠性评估数据不足的重要来源，针对潜艇保障鱼雷装载数量较少的实际情况，在完成实艇装载的基础上或性能鉴定试验后期开展全雷实验室加速试验，记加速等效试验数据 (T_2, r_2)，其中 T_2

为鱼雷实验室加速试验总时间， r_2 为鱼雷实验室加速试验故障数。

4.2 装载故障判定方法

潜载鱼雷装载可靠度任务剖面：从鱼雷战雷装填于潜艇并经调试合格开始，至鱼雷射前准备不可逆动作前或到达在规定装载时间卸载后解除武装为止。出现下列情况之一，判定发生装载故障。

1) 在潜艇装载期间鱼雷日常维护过程中，出现鱼雷功能不正常或性能参数不符合技术指标要求；

2) 在潜艇发射鱼雷准备过程中，因出现鱼雷问题导致不能正常发射准备程序或者不能正常发射鱼雷；

3) 从鱼雷装载期满卸载返回技术阵地后全雷检测过程中，出现鱼雷功能不正常或性能参数不符合技术指标要求。

4.3 装载可靠度综合评估方法

鱼雷装载可靠度 MTBF 区间估计为：

$$MTBF = \frac{2(T_1 + T_2)}{\chi^2_{\beta}(2r_1 + 2r_2 + 2)} \quad (7)$$

式中， t_0 为使用方风险， β 为置信水平。

鱼雷装载可靠度置信下限 R_L ：

$$R_L = \exp\left(-\frac{t_0}{MTBF}\right) \quad (8)$$

5 算例

假设鱼雷装载可靠度指标为装载时间为 1 年，最低可接受值为 0.8，置信度为 0.8，以表 2 中试验方案 2 为例，进行鱼雷装载可靠度试验，即 2 条鱼雷实艇装载不少于 1 年时间，1 条鱼雷试验加速等效时间不少于 45 684 h。

5.1 加速试验

在加速试验剖面的基础上，按照加速试验模型，分别确定加速试验循环数、高温等效总持续时间、加速试验因子和加速振动时间。

5.1.1 高温等效总持续时间

参照 GJB899A 中的“潜艇舱内设备工作可靠性综合环境试验剖面”，选用低温持续时间为 8 h，高温持续时间分别为 14 h。参照低温、高温持续时间比例，鱼雷实艇装载 45 684 h 时，计算低温 5 °C 时恒温持续时间为 15 228 h，高温 35 °C 时恒温持续时间为 26 649 h。

假设鱼雷装载期间潜艇温度 5 ~ 30 °C、加速试验剖面高温 60 °C，由公式 (3) 计算加速因子和高温加速试验等效持续时间，如表 3 所示。

表 3 高温加速等效实际装载持续时间

实艇温度 / °C	持续时间 / h	加速温度 / °C	加速因子	等效时间 / h
5 °C	15 228	60 °C	495.2	30.8
30 °C	26 649	60 °C	22.3	1 195.0

5.1.2 加速试验循环数

根据潜艇温差 25 °C、最高温 30 °C 以及加速试验温变率 5 °C/h、温差 60 °C、最高温 60 °C，由公式 (5) 计算温

度加速试验循环数约为 57。

5.1.3 每循环试验时间

根据高温加速等效实际装载持续时间 1 225.8 h、加速试验的循环数 57, 计算每循环加速剖面 60 °C 温度保持时间为 21.5 h。假设加速试验 0 °C 温度保持时间 1.5 h, 则加速试验每个循环温度总时间为 23.0 h。

5.1.4 加速试验因子

根据加速试验的循环数 57、每个循环温度总时间 23.0 h, 得到加速试验总时间为 1 311 h。根据等效加速试验时间 45 684 h, 计算加速试验因子为 34.8。

5.1.5 加速振动时间

根据潜艇航行时振动量值 0.20 Grms、抛锚停泊时振动量值 0.10 Grms, 实验室振动量值 0.5 Grms, 由公式 (6) 计算加速振动等效时间为 347.2 h, 加速试验 57 个循环中每循环施加随机振动谱的时间为 6.1 h。

5.2 装载可靠度综合评估

若 2 条战雷位艇上各装载 13 个月, 1 条鱼雷在实验室加速 58 个循环, 则艇上装载试验数据 (T_1, r_1) 为 (18 960, 0), 加速等效试验数据 (T_2, r_2) 为 (46 423, 0)。

根据公式 (7) 可计算鱼雷装载可靠度 MTBF 为 52 306 小时。

根据公式 (8) 可计算鱼雷装载可靠度的置信下限为 0.84, 满足最低可接受值 0.8 的指标要求。

5.3 不同装载试验方案对比分析

在使用方风险和研制方风险均为 0.2 的条件下, 不同鱼雷装载可靠度试验方案所需试验总时间如下:

二项分布定数试验方案: 在无故障条件下, 至少需要 8 条鱼雷装载 1 年时间, 试验总时间为 70 080 小时。

指数分布定时试验方案: 在无故障条件下, 试验总时间至少需要 63 204 小时。

实艇装载+加速试验相结合试验方案: 在无故障条件下, 2 条鱼雷装载 1 年时间, 加速试验循环数为 57、每个循环 23 小时, 试验总时间为 18 831 小时。

通过对比分析三种试验方案, 实艇装载+加速试验相结合方案所需试验总时间远小于其它两种试验方案。

6 结束语

本文针对经典可靠性评估方法难以满足新型鱼雷装载可靠性试验鉴定需求, 应用加速试验等效原理, 通过分析了影响鱼雷潜艇装载环境应力主要因素, 运用恒温应力、温变循环、振动疲劳加速模型, 设计了装载可靠度总体试验方案和加速试验剖面, 确定了加速试验因子和加速振动时间, 形成了一种实际装载与实验室加速相结合的潜载鱼雷装载可靠度试验综合评估方法。该方法在保证试验评估结论可信的同时可大幅提高试验实效, 解决了可在较短时间内潜载鱼雷装载可靠度试验考核问题, 不仅可推广应用至其他类型鱼雷的可靠性试验

鉴定中, 还可在一定程度上指导鱼雷可靠性的研制和设计。如何利用实测潜艇装载环境数据完善加速试验应力参数, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 贺成刚, 高江. 一种改进的鱼雷装载可靠度鉴定试验方法 [J]. 鱼雷技术, 2016, 24 (3): 145-149.
- [2] 刘海波, 钟强辉. 鱼雷装载可靠性试验优化设计 [J]. 四川兵工学报, 2014, 35 (12): 31-34.
- [3] 齐立新, 宁永成, 邢国强. 火箭助飞鱼雷装载可靠度的 Bayes 检验方法 [J]. 鱼雷技术, 2012, 20 (5): 388-391.
- [4] 宋保维, 李彩霞, 梁庆卫, 等. 鱼雷加速可靠性试验体系 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35 (7): 1-3.
- [5] 卞大鹏, 王胜兵. 装备可靠性装载试验方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2015, 256 (10): 122-124.
- [6] 张生鹏, 李宏民, 赵朋飞. 导弹装备贮存寿命加速试验技术体系探讨 [J]. 装备环境工程, 2018, 15 (2): 92-96.
- [7] 朱文振, 王松林, 王昊. 一种电动力鱼雷实航工作可靠度评估方法 [J]. 水下无人系统学报, 2017, 25 (3): 293-296.
- [8] GJB899A-2009 可靠性鉴定与验收 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.
- [9] 张海, 余闯, 王晓红. 应用环境分类的加速贮存退化试验评估方法 [J]. 装备环境工程, 2014, 11 (2): 87-91.
- [10] 陈兵, 李星. 加速寿命试验技术在国内外工程应用研究 [J]. 强度与环境, 2010, 37 (10): 31-38.
- [11] 杨光, 李金国, 陈丹明, 等. 产品加速试验应用原理分析 [J]. 装备环境工程, 2006, 3 (4): 55-61.
- [12] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究 [J]. 装备环境工程, 2019, 16 (3): 81-87.
- [13] 申争光, 苑景春, 董静宇等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37 (8): 1948-1952.
- [14] GB/T 34986-2017/IEC 62506: 2013, 产品加速试验方法 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.
- [15] GB/T 7289-2017/IEC 61709: 2013, 电子元器件可靠性失效率的基准条件及转换应力模型 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.
- [16] 刘娜娜. 一种基于温度循环应力施加的加速寿命试验模型应用 [J]. 中国科技纵横, 2018, 17 (9): 55-56.
- [17] 孔耀, 袁宏杰, 王政, 等. 地面雷达可靠性加速试验方法研究 [J]. 装备环境工程, 2020, 17 (8): 110-114.
- [18] GJB150. 16A-2009 军用装备实验室环境试验方法 振动试验 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.
- [19] GJB 531B-2012 鱼雷通用规范 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012.
- [20] 肖志斌, 倪修华, 魏颖, 等. 军用电子铲平加速应力筛选方法的应用分析研究 [J]. 制导与引信, 2017, 28 (4): 43-47.