

# 复杂环境应力下典型机电产品贮存-值班寿命 加速试验方法研究

荣双龙<sup>1</sup>, 赵鹏飞<sup>1</sup>, 刘艳<sup>2</sup>, 王增凯<sup>2</sup>

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854; 2. 北京电子系统工程总体研究所, 北京 100191)

**摘要:** **目的** 建立复杂环境应力下机电产品贮存-值班寿命加速试验方法。**方法** 依据机电产品贮存-值班寿命剖面、环境因素及基准条件, 考虑关键部件可能产生的环境效应与累积损伤, 选取拟模拟与加速的环境因素, 按照环境应力施加时序及损伤模型, 提出一种综合考虑机电产品贮存-值班过程中温度、湿热、盐雾、太阳辐照、温度循环、振动和冲击等环境应力对其寿命影响的加速试验方法。**结果** 建立了某典型机电产品复杂环境下贮存-值班寿命加速试验剖面。**结论** 复杂环境应力下机电产品贮存-值班寿命加速试验充分考虑了机电产品在贮存-值班过程中经历的环境应力, 能够在一定程度表征机电产品贮存-值班过程中各种环境应力的累积叠加效应。

**关键词:** 机电产品; 贮存-值班寿命; 复杂环境应力; 累积效应; 损伤模型; 加速试验

中图分类号: TJ760.89

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)07-0019-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.07.003

## Accelerated Test Method for Storage-Duty Life of Typical Electromechanical Products under Complex Environmental Stress

RONG Shuanglong<sup>1</sup>, ZHAO Pengfei<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, WANG Zengkai<sup>2</sup>

(1. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China; 2. Beijing Institute of Electronics Systems Engineering, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish an accelerated test method for storage-duty life of typical electromechanical products under complex environmental stress. Based on the analysis of the storage-duty life profile, environmental factors and base conditions of electromechanical products, the environmental factors for simulation and acceleration were selected considering the possible impact of environmental effects and accumulated damage on key components. According to the time sequence of environmental stress application and damage model, an accelerated test method was proposed, which comprehensively considered the effect of environmental stress on the life of electromechanical products during storage-duty, such as temperature, damp heat, salt spray, solar irradiation, temperature cycle, vibration, impact, etc. The accelerated test profile for storage-duty life of a typical electromechanical product under complex environment was established. The accelerated life test of electromechanical products

收稿日期: 2024-05-15; 修订日期: 2024-07-11

Received: 2024-05-15; Revised: 2024-07-11

基金项目: 技术基础科研项目 (JSHS2020209A001)

Fund: Technical Basic Scientific Research Project (JSHS2020209A001)

引文格式: 荣双龙, 赵鹏飞, 刘艳, 等. 复杂环境应力下典型机电产品贮存-值班寿命加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(7): 19-27.

RONG Shuanglong, ZHAO Pengfei, LIU Yan, et al. Accelerated Test Method for Storage-Duty Life of Typical Electromechanical Products under Complex Environmental Stress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 19-27.

under complex environmental stress fully considers the environmental stress experienced by electromechanical products during storage-duty, and can represent the accumulated superposition effect of various environmental stresses during storage-duty of electromechanical products to a certain extent.

**KEY WORDS:** electromechanical products; storage-duty life; complex environmental stresses; accumulated effect; damage models; accelerated test

目前装备的贮存方式由以往的长期库房贮存向着贮存-值班的方式转变, 经历的环境载荷更复杂, 同时用户对装备的贮存寿命及贮存后使用可靠性的指标要求越来越高。机电产品作为装备的重要单机设备, 要求其在长期贮存-值班过程中能够抵抗各类复杂环境因素及其应力产生的劣化效应, 在达到贮存期后仍能满足订购合同规定的高可靠性要求。机电产品在研制阶段虽然按照指标要求开展了高可靠、长寿命设计, 但其贮存寿命及贮存后的使用可靠性是否真正达到用户的要求还需要开展进一步的验证和评价工作。开展模拟机电产品实际贮存条件下的自然贮存与值班过程的寿命试验, 虽然能够保证产品经历的环境应力作用过程更符合实际使用, 但试验周期漫长且需要投入大量的人力、物力, 试验成本高, 试验数据提取往往具有滞后性, 不能及时发现影响产品贮存可靠性的潜在缺陷和短板, 无法及时有效地向设计人员反馈机电产品的贮存寿命设计改进措施。因此, 实验室加速试验已经成为贮存寿命验证与评价的主要手段, 并有逐渐替代自然贮存试验的趋势<sup>[1-6]</sup>。加速试验设计一方面要尽可能模拟和强化装备经历的环境影响和作用, 另一方面, 加速系数的设置要合理, 应不改变装备贮存-值班过程中的实际失效机理。目前的加速试验方法大多选取装备库房贮存过程经历的温度、湿度等环境因素作为加速试验应力<sup>[7-19]</sup>, 忽略了装备户外值班过程所经历的阳光辐照、盐雾、振动、冲击等环境因素对装备累积损伤的影响, 导致机电产品出现“欠试验”考核不足、“指标冒险”误评价等验证问题, 直接影响机电产品交付使用后的战备完好性, 企业因产品履约不到位而产生信誉风险, 装备因突发性质量问题可能产生不可接受的严重后果。因此, 很有必要依据机电产品实际经历的贮存-值班寿命剖面与环境剖面, 合理选取拟模拟与加速的环境因素, 按照环境应力施加时序及损伤模型, 将机电产品基准环境剖面当量等效为加速试验应力剖面, 并通过试验实施与状态监测建立机电产品复杂环境应力下贮存-值班寿命加速试验方法。

文中依据机电产品贮存-值班寿命剖面、环境因素及基准条件, 考虑关键部件可能产生的环境效应与累积损伤, 选取典型环境因素, 考虑环境应力施加时序及损伤模型, 提出一种综合考虑机电产品贮存-值班过程中温度、湿热、盐雾、太阳辐照、温度循环、振动和冲击等环境应力对其寿命影响的加速试验方法。

## 1 加速试验设计思路

某型号机电产品交付后要经历库房贮存、测试待发、户外挂机值班等任务阶段, 面临的环境因素多样, 既有自然环境, 又有诱发环境, 亟需验证其在复杂环境下的贮存-值班寿命能够满足型号要求。以此为背景, 针对机电产品的特点, 提出复杂环境下机电产品贮存-值班寿命加速试验设计的基本思路, 如图 1 所示, 主要包括如下步骤:

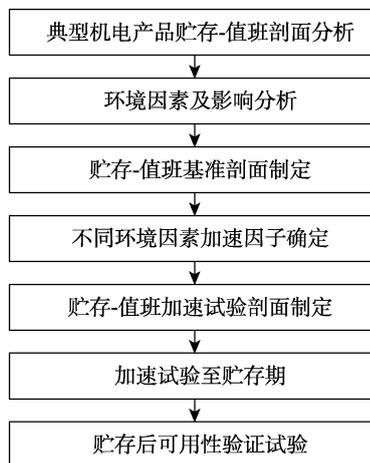


图 1 机电产品贮存-值班加速试验设计思路  
Fig.1 Design idea of accelerated test method for storage-duty life of typical electromechanical products

- 1) 贮存-值班剖面分析。通过对机电产品典型贮存-值班剖面分析, 确定经历的环境因素。
- 2) 环境因素及影响分析。基于对机电产品典型贮存-值班剖面分析识别的环境因素, 结合机电产品的特点, 分析环境因素对机电产品寿命的影响, 确定敏感环境因素。
- 3) 贮存-值班基准剖面制定。依据机电产品典型贮存-值班寿命剖面, 按照环境应力施加时序, 制定机电产品贮存-值班基准剖面。
- 4) 不同环境因素加速因子确定。综合利用组成机电产品的器件、材料贮存寿命数据、加速模型等信息, 评估不同环境因素加速因子。
- 5) 贮存-值班加速试验剖面制定。根据机电产品贮存-值班基准剖面、不同环境因素加速因子, 将机电产品基准环境剖面当量等效为加速试验应力剖面。基于加速试验剖面对机电产品施加加速应力, 验证机电产品  $N$  年的贮存-值班寿命。

6) 可用性验证试验。在完成等效  $N$  年贮存-值班寿命的加速试验后, 对机电产品进行环境试验等可用性验证试验, 验证机电产品加速试验后的可用性。

## 2 机电产品贮存-值班剖面分析

贮存环境是指产品在库房贮存所处的环境, 值班环境是指产品战斗执勤状态下所处的环境。某型机电

产品基准贮存-值班剖面如图 2 所示, 总寿命为  $N$ , 其中库房贮存为  $N_1$ , 户外测试待用期为  $N_2$ , 户外值班状态为  $N_3$ 。库房贮存期间主要的应力为温度, 户外测试待用、户外值班过程中主要应力包括温度循环、湿度、盐雾、太阳辐射、振动和冲击。依据装备部署使用要求及寿命-任务剖面, 本次试验选取装备寿命期可能遇到的严酷海洋大气环境条件作为基准参考环境条件, 典型的海洋大气环境条件见表 1。

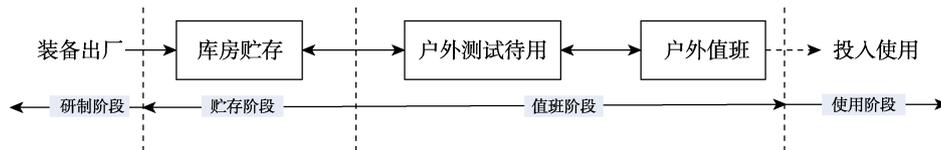


图 2 装备贮存-值班寿命剖面  
Fig.2 Storage-duty life profile of equipment

表 1 寿命周期内各阶段的典型环境条件  
Tab.1 Typical environmental conditions at each stage of life cycle

寿命阶段	环境因素	环境条件		累计作用时间
		范围	年平均值	
库房贮存	温度	0~30 °C	20 °C	$N_1$
	相对湿度	35%~70%	50%	
户外测试待用	温度	12.6~35.4 °C	26.9 °C	$N_2$
	相对湿度	61%~91%	80%	
	海盐离子	0.001 0~0.004 2 mg/(100 cm <sup>2</sup> ·d)	0.002 1 mg/(100 cm <sup>2</sup> ·d)	
户外值班	温度	9.4~35.9 °C	25.1 °C	$N_3$
	相对湿度	36%~98%	84%	
	海盐离子	0.112 2~0.796 9 mg/(100 cm <sup>2</sup> ·d)	0.346 7 mg/(100 cm <sup>2</sup> ·d)	
	太阳辐射	/	日均 1 420 J/(cm <sup>2</sup> ·d)	
	温度循环	-55~70 °C	/	
	振动 冲击	见图 3 半正弦波形, 峰值 12g, 持续时间为 20~40 ms		

## 3 贮存-值班基准剖面制定

### 3.1 环境因素及影响分析

某机电产品主要由控制装置、执行机构及其元件、框架结构等部分组成, 在使用过程中主要起到控制和调整装备姿态的功能。在库房贮存中, 传动部件和结构件对温度应力等环境因素不敏感, 而控制装置中的控制器、电子电路、机电产品等会始终受到温度热老化等环境效应的累加影响, 出现性能退化、参数漂移等故障模式。与库房贮存环境相比, 户外测试待发、户外值班环境更加恶劣、复杂, 值班时, 海洋环境中的高温、高湿、高盐、温度交变、太阳辐射等综合作用会加速结构表面涂层开裂脱落、材料的腐蚀和老化, 再叠加挂飞和着陆过程中产生的长时间随机振动、冲击等机械应力, 造成构件腐蚀-疲劳破坏、疲劳强度和挂飞寿命下降等, 失去相应的承载、伺服控

制功能<sup>[16]</sup>。因此, 机电产品贮存-值班过程中承受的是综合应力, 为考核和验证贮存-值班寿命, 保证试验考核的充分性, 结合目前国内各试验室的综合应力试验能力, 应尽可能考虑温度、湿度、盐雾、太阳辐射、振动、冲击等综合应力条件。

### 3.2 贮存-值班环境条件

1) 库房贮存阶段。库房贮存时, 环境温度和湿度条件相对比较稳定(见表 1), 这里取其年平均值作为基准环境条件, 即温度为 20 °C, 相对湿度为 50%。

2) 户外测试待用阶段。户外测试待用期间, 一般在简易的中转库房或棚下进行, 温度、湿度、盐雾沉降等环境条件与户外环境条件基本类似, 且不会受到太阳辐射的直接作用。户外测试待用期间温度和相对湿度范围见表 1, 取其年平均值作为基准环境条件, 即温度为 26.9 °C, 相对湿度为 80%。与户外值班期间温度和相对湿度合并考虑, 取平均则温度为

26℃，相对湿度为82%。盐雾沉降速率范围见表1，日均海盐离子浓度为0.0021 mg/(100 cm<sup>2</sup>·d)。

3) 户外值班阶段。装备在户外值班期间，大部分时间完全暴露在大气自然环境中，直接经受温度、湿度、盐雾、太阳辐照等环境因素影响，且随平台循环搭载产生和经历温度循环、振动、冲击等力学环境。将户外测试待用温度和相对湿度合并考虑，取平均则温度为26℃，相对湿度为82%。某机电产品在搭载平台进行值班期间，会经历随空间高度变化而产生的温度循环应力，温度范围为-55~70℃。户外大气沉降速率范围见表1，日均海盐离子浓度为0.3467 mg/(100 cm<sup>2</sup>·d)。

4) 太阳辐照。典型值班区域日均太阳辐射量为1420 J/(cm<sup>2</sup>·d)，年均辐射总量为518.3×10<sup>7</sup> J/m<sup>2</sup>，温度不超过60℃。装备在户外值班期，每年累积1个月的时间受太阳辐射作用，因此年均辐射总量为43.2×10<sup>7</sup> J/m<sup>2</sup>，户外值班状态的辐射总量为43.2 N<sub>3</sub>×10<sup>7</sup> J/m<sup>2</sup>。

5) 振动。随搭载平台在典型挂飞状态下的耐久振动谱型及量级如图3所示，x、y、z每轴向振动183 min，对应总寿命N内的M次搭载。

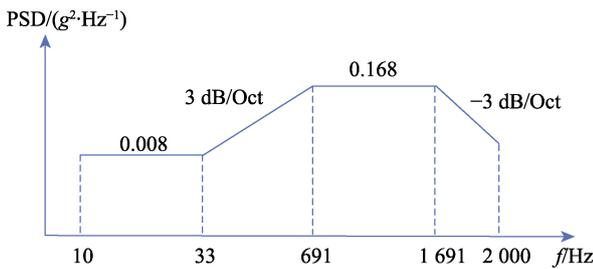


图3 典型搭载状态下的耐久振动条件  
Fig.3 Durable vibration conditions under typical loading conditions

6) 冲击。装备在N<sub>3</sub>内的平台搭载值班次数为M次，着陆冲击条件见表2，冲击施加方向为y向，半正弦波形，持续时间为20~40 ms，2次冲击间隔时间不少于2 s。

表2 冲击条件  
Tab.2 Impact conditions

名称	量级	
冲击加速度/g	12	9
冲击次数	M	M <sub>1</sub>

### 3.3 基准贮存-值班环境剖面编制

按照装备库房贮存与户外测试待用/值班的时间比例(N<sub>a</sub>:N<sub>b</sub>)，考虑到贮存-值班过程中库房贮存和户外测试待用、户外值班交替进行，同时从便于试验实施的角度出发，1个周期的基准剖面包括库房贮存和户外测试待用、户外值班，1个周期的时间设置为N<sub>基准</sub>，基准贮存-值班环境剖面如图4所示。

## 4 模拟装备贮存-值班的加速试验剖面设计

### 4.1 试验项目确定

依据某机电产品贮存-值班寿命剖面、环境因素及基准条件，结合可能产生的环境效应与累积损伤，拟分别对应设置的综合环境应力试验项目包括：模拟库房贮存期间为温度应力试验，模拟户外待用期间为湿热应力试验和盐雾试验，模拟户外值班期间为湿热应力试验、太阳辐照试验、温度循环试验、盐雾试验、

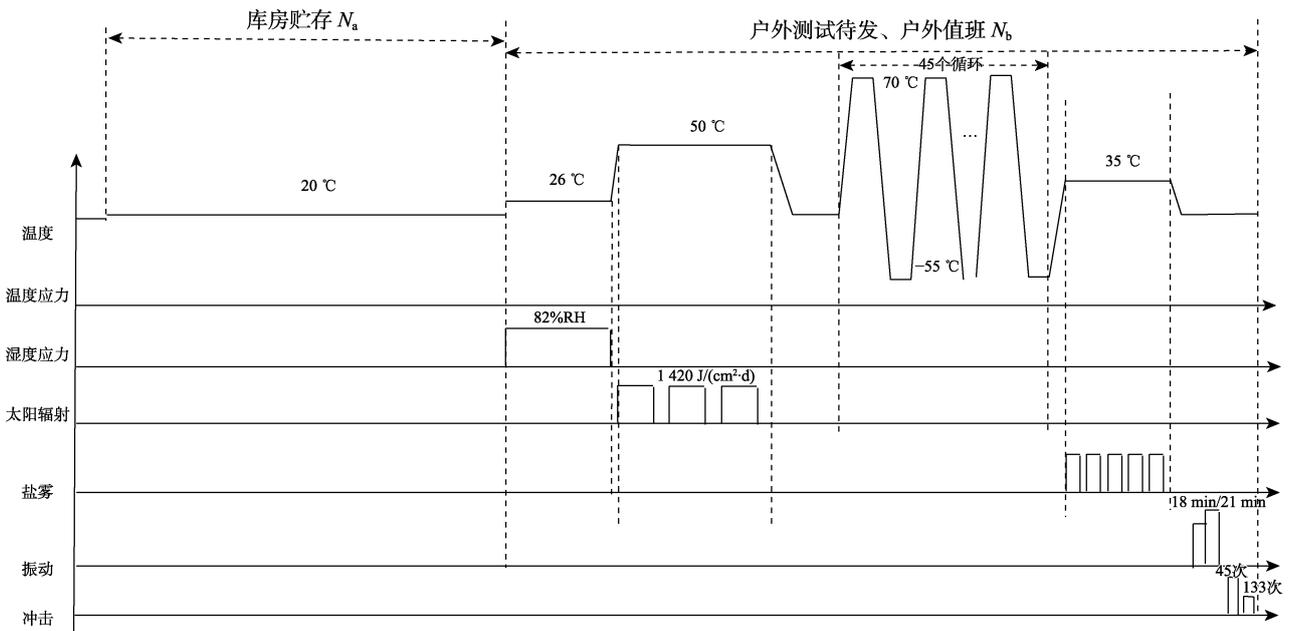


图4 贮存期为N<sub>基准</sub>的基准贮存-值班环境剖面  
Fig.4 Base storage-duty environmental profile with storage period of N<sub>base</sub>

振动试验和冲击试验等。加速应力试验项目及施加顺序如图 5 所示, 共进行  $X=N/N_{\text{基准}}=N/(N_a+N_b)$  个周期。

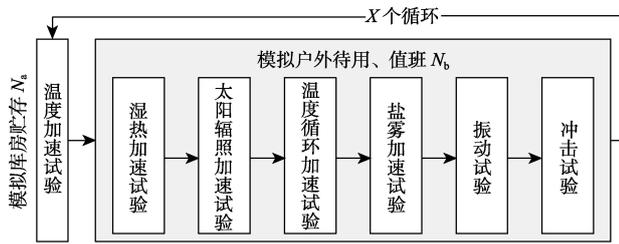


图 5 加速应力试验项目及施加顺序设置  
Fig.5 Setting of accelerated stress test items and application sequence

### 4.2 加速试验激活能确定

产品从正常的未失效状态向失效状态转换的过程中存在着势垒, 这就是激活能, 而跨越这种势垒所必须的能量由环境提供<sup>[20]</sup>。因此, 产品激活能的确定是开展其贮存寿命验证的关键。已知机电产品主要由控制装置、传动部件、结构件等部分组成。其中, 控

制装置主要由伺服机构和控制器组成, 控制器主要组成为电子器件及部件, 可以归为电子产品, 伺服机构主要由电机和执行机构组成, 可以归为机电部件。传动部件主要由钛合金和陶瓷涂层构成。舱体结构由高强铝合金和防护涂层组成。在装备贮存和值班过程中, 传动部件和结构件对温度应力等环境因素不敏感, 而控制器作为机电产品贮存寿命及可靠性研制的薄弱环节, 按照薄弱环节竞争失效规律和“短板”理论, 考虑将其激活能作为整个机电产品的激活能选取参数。

通过调研和查阅 IEC、美军标、航天行业等类型标准及以往装备相似产品的加速应力试验数据(见表 3)<sup>[7,21-25]</sup>, 归纳出装备典型电子产品的激活能范围为 0.5~0.6 eV, 且伺服机构激活能研究数据为 0.75 eV, 所以控制装置(含电子产品和机电产品)激活能应在 0.5~0.75 eV 进行选取。同时, 产品其他组成部件大部分为硬质合金及非金属材料(激活能约 0.7 eV)。因此, 综合考虑机电产品组成部件的激活能参数及相互影响规律, 产品激活能大约处于 0.5~0.7 eV, 本项目确定为 0.6 eV。

表 3 机电产品主要组成部件的激活能参考数据

Tab.3 Reference data of activation energy of key components in electromechanical products

组成单元	主要配套	主要部件/材料	选取的激活能/eV	历史数据参考	备注
控制装置	控制器(电子产品)	电源交换电路、FPGA、数字信号处理器等	0.60	1) IEC、美军标等标准推荐取值范围 0.4~0.7 eV;	多型装备电子产品加速贮存试验结果,归纳为 0.5~0.6 eV
				2) QJ 908B 中电子产品推荐激活能为 0.6 eV;	
结构件	伺服机构(机电产品)	电机、传感器、框架等	0.75	某伺服机构加速试验激活能取 0.75 eV	装备课题研究成果资料
	基材	高强铝合金	/	表面涂覆有涂层和面漆,主要考虑盐雾腐蚀	
传动部件	钛合金基材+陶瓷涂层	颗粒增强树脂基复合材料	0.70	非金属材料及复合材料试验测得的活化能范围 0.3~1.0 eV	多型复合材料加速寿命试验结果
				钛合金及陶瓷涂层耐老化和耐腐蚀性能优异,影响可忽略	

### 4.3 加速试验剖面参数设计

1) 温度应力。结合高温摸底试验结果, 加速温度应力设置为 90 °C, 恒定高温加速应力试验采用常用的阿伦尼斯模型<sup>[18]</sup>, 其表达式为:

$$\xi = Ae^{E_a/KT} \quad (1)$$

加速因子为:

$$A_F = \frac{t_0}{t_1} = \exp\left[\frac{E_a}{K}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (2)$$

式中:  $\xi$  为产品寿命特征, 如平均寿命、中位寿命、特征寿命等;  $A$  为常数;  $E_a$  为产品激活能, 与材料有关;  $K$  为波尔兹曼常数, 取  $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  为基准贮存温度应力;  $T_1$  为加速温度应力。

库房贮存的基准温度为 20 °C, 激活能取 0.6 eV, 则加速因子及试验时间见表 4。试验按  $X$  个周期进行, 每个周期进行  $N_1/(90X)$ 。

2) 湿热应力。考虑试验激发应力与失效机理的一致性, 湿热应力确定为温度 80 °C、相对湿度 95%。在湿热环境下, 采用恒定温湿度的 Peck 模型<sup>[12]</sup>, 即:

表4 恒定温度应力加速因子及试验时间  
Tab.4 Acceleration factor and test time at constant temperature stress

温度加速应力/℃	加速因子估算	等效库房贮存年的试验时间/h	等效库房贮存 $N_1$ 的试验时间/h
90	97.4	90	$N_1/90$

$$\xi = \frac{A}{(R_H)^B} \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right) \quad (3)$$

式中： $R_H$ 表示相对湿度； $B$ 为逆幂指数，取1~9； $T$ 为热力学温度； $E_a$ 为材料的激活能。对式(3)两边取对数，可得到温度-湿度( $T', R_H'$ )对( $T, R_H$ )的加速系数：

$$K_{(T',R_H')-(T,R_H)} = \left(\frac{R_H'}{R_H}\right)^B \exp\left[\frac{E}{K}\left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

已知机电产品激活能为0.6 eV，根据IEC62059-31等有关标准，推荐 $B$ 值取3，则温度80℃、相对湿度95%对应的加速因子为54.63。湿热试验总试验时间为 $(N_2+N_3)/54.63$ ，试验按 $X$ 周期进行，每个周期进行 $(N_2+N_3)/(54.63X)$ 。

3) 太阳辐照。根据常用太阳辐照试验标准及模拟设备的辐照能力 ( $50 \text{ W/m}^2 \leq P \leq 1120 \text{ W/m}^2$ )，考

虑试验周期和机理一致性，温度设定为50℃，辐照功率为1120 W/m<sup>2</sup>，湿度不控制。依据辐照剂量等效的原则进行加速。已知机电产品户外值班期辐照总量 $Q$ 为 $43.2N_3 \times 10^7 \text{ J/m}^2$ ，试验辐照功率 $P$ 为1120 W/m<sup>2</sup>，则总试验时间 $T=Q/P=107.03N_3$ 。为了充分模拟自然环境的昼夜及热应力交替效应，依据GJB 150.7A—2009《军用装备实验室环境试验方法第7部分：太阳辐射试验》程序II有关试验方法：采用含有4h无照射期的24h循环周期模式，并分为 $X$ 个周期进行。

4) 温度循环应力。机电产品在户外值班期 $N_3$ 内要实现平台搭载 $M$ 次，搭载期间交变温度范围为-55~70℃，即温差为125℃。根据机电产品可靠性强化试验结果，低温步进截止温度为-60℃，高温步进截止温度为90℃，在不改变产品失效模式和失效机理的情况下，温度循环加速应力定为低温工作极限温度提高5℃，高温工作极限温度降低5℃，即-55~85℃。根据GJB 4.2—1983《舰船电子设备环境试验高温试验》推荐的保温时间，受试产品总质量为40 kg，介于15~150 kg，温循试验的高温保持4h，低温保持4h，温度变化率为5℃/min。

温度循环应力加速模型为COFFIN-MANSON模型，即：

表5 湿热试验加速因子及试验时间  
Tab.5 Acceleration factor and test time at hygrothermal stress

基准条件	加速条件	模型参数	加速因子	等效值班( $N_2+N_3$ )的试验时间/h
温度为26℃,相对湿度为82%	温度为80℃,相对湿度为95%	$B$ 取3, $E_a$ 取0.6 eV	54.63	$(N_2+N_3)/(54.63X)$

$$\Delta T^p N = C \quad (5)$$

式中： $N$ 是试验循环数， $\Delta T$ 是温度循环的温差， $C$ 为常数， $p$ 为与材料属性有关的系数。得到加速因子为：

$$A_F = \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_0}\right)^p \quad (6)$$

式中： $\Delta T_1$ 为加速温度变化范围； $\Delta T_0$ 为基准贮存温度变化范围。

根据有关标准推荐的 $p$ 值如表6所示<sup>[21]</sup>。由于舵系统组成含有机械和电子产品，综合考虑，本实验 $p$ 值取4，则加速因子为1.6。

表6  $p$ 值标准推荐值  
Tab.6 Recommended value of  $p$

类型	机械	有铅电子产品	无铅电子产品
$p$ 值范围	3~25	2~3	2~3
$p$ 值推荐	10	2.5	2.65

温度循环加速试验共进行 $M/1.6$ 个循环，分 $X$ 个周期进行，每个周期进行 $M/1.6X$ 个循环，见表7。

表7 温度循环加速因子及试验时间  
Tab.7 Acceleration factor and test time of temperature cycle

温度循环应力/℃	加速因子	等效值班 $N_3$ 的循环次数
-55~85	1.6	$M/1.6$

5) 盐雾。腐蚀溶液采用5%NaCl+0.05%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0.05%CaCl<sub>2</sub>的混合溶液，此溶液具有很好的海洋大气环境腐蚀加速性，并依据外场大气环境雨水pH值的监测结果(约5.5)，使用少量稀盐酸调节盐溶液pH=5.5。采用的“盐雾-干燥-湿润”酸性循环盐雾试验条件设置如表8所示。

根据腐蚀损伤模式一致和腐蚀损伤等效的原则，即自然环境暴露条件和实验室加速实验条件下腐蚀损伤等量的当量折算法原则(即二者腐蚀电量相等)进行盐雾加速腐蚀试验。在暴露时间 $t$ 内，金属的腐蚀电量 $Q$ 可用积分形式表示为<sup>[26]</sup>：

$$Q = \frac{1}{F} \int_0^t I_c d\tau \quad (7)$$

式中： $F$ 为法拉第常数； $I_c$ 为不同环境中的电流； $t$ 为环境作用时间。

表 8 酸性循环盐雾加速腐蚀试验条件  
Tab.8 Test conditions for accelerated corrosion of acid circulating salt spray

试验类型	试验条件
盐溶液	5%NaCl+0.05%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +0.05%CaCl <sub>2</sub> 的混合溶液, pH=4
盐雾过程	温度为(40±2)℃, 持续时间为 12 h, 盐溶液沉降率为 1~3 mL/(80 cm <sup>2</sup> ·h)
干燥过程	温度为(60±2)℃, RH < 30%, 持续时间为 6 h
湿润过程	温度为(50±2)℃, RH ≥ 95%, 持续时间为 6h
转换时间	盐雾→干燥: <30 min; 干燥→湿润: <15 min; 湿润→盐雾: <30 min
单次循环时间	24 h

对于给定的金属材料及其组合, 若在现场环境条件下的电流为  $I_c$ , 暴露时间为  $t$ , 腐蚀量为  $Q$ ; 而其加速腐蚀试验谱作用下的腐蚀电流为  $I'_c$ , 试验时间为  $t'$ , 腐蚀量为  $Q'$ , 根据式 (7) 则有:

$$Q' = \frac{1}{F} \int_0^{t'} I'_c d\tau \quad (8)$$

根据腐蚀量相等准则  $Q=Q'$ , 得出:

$$I_c t = I'_c t' \quad (9)$$

由此得到:

$$t' = \frac{I_c}{I'_c} t \quad (10)$$

引入折算系数, 即加速因子:

$$\alpha = \frac{I_c}{I'_c} \quad (11)$$

则有:

$$t' = \alpha t \quad (12)$$

式 (12) 给出了 2 种环境中腐蚀量相等对应的作用时间关系, 是用当量折算法建立加速试验谱与大气环境谱作用时间之间当量关系的基础。

已知机电产品大部分组成材料为铝合金, 结合以往装备酸性盐雾加速腐蚀试验数据, 本次盐雾试验当量加速系数约为  $\beta=t_1/t_2=159.3 \text{ h/a}$  [27], 即盐雾试验作用约 159.3 h (6.6 d) 相当于外场暴露 1 a 的盐雾环境腐蚀程度。

等效的户外值班时间为  $N_3$ , 则盐雾加速试验总时间为  $6.6N_3$  天或循环, 试验分  $X$  个周期进行, 每个周期进行  $6.6N_3/X$  个循环的盐雾试验。

6) 振动应力。GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分: 振动试验》确定的振

动疲劳关系表达式如下:

$$(W_0 / W_1)^b = (t_1 / t_0) \quad (13)$$

式中:  $W_0$  和  $W_1$  分别为规定的和施加的随机振动量级 (功率谱密度),  $g^2/\text{Hz}$ ;  $t_0$  和  $t_1$  分别为规定的和施加的时间, min;  $b$  为材料常数 (疲劳曲线的斜率), 对于该类装备, 指数值为 3.25~6.6, 本次试验拟取  $b=4$ 。

依据机电产品安装结构动态特性及振动预试验结果分析, 本次模拟挂飞振动拟采取谱型不变, 量级降低且不低于功能振动条件, 时间延长 (见图 6) 的振动条件等损伤转化方法, 即设定  $W_1=0.105 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ,  $W_0=0.168 \text{ g}^2/\text{Hz}$  和  $t_0=183 \text{ min}$  为已知条件, 代入式 (13) 即可得到设定的振动时间约为  $t_1=1\,199.3 \text{ min}$  (等效  $N$  年); 结合贮存检测周期设置情况, 每 6 个月振动 1 次的时间约为  $T=t_1/2N$ 。

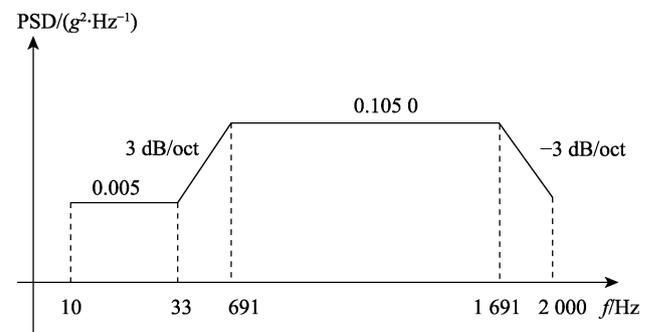


图 6 模拟振动应力条件  
Fig.6 Simulated vibration stress condition

7) 冲击试验条件。依据冲击环境应力对装备结构的损伤机理, 本次试验对冲击条件不进行加速, 并与其他环境应力进行综合和循环叠加。冲击按  $X$  个周期施加, 每个周期的冲击次数见表 9。

表 9 冲击试验条件  
Tab.9 Impact condition

名称	量级	
冲击加速度/g	12	9
冲击次数/循环	$M/X$	$M_1/X$

#### 4.4 复杂环境应力加速试验剖面

依据确定机电产品敏感环境应力加速试验条件, 按照装备实际使用的贮存-值班寿命剖面和环境应力作用次序, 对多因素环境应力试验项目进行有机叠加和组合, 构成的装备机电产品模拟贮存-值班的复杂环境应力加速试验剖面如图 7 所示。每执行 1 次试验剖面等效实际贮存-值班时间为  $N/X$ , 并在每次试验循环结束后安排 1 次机电产品功能/性能检测。

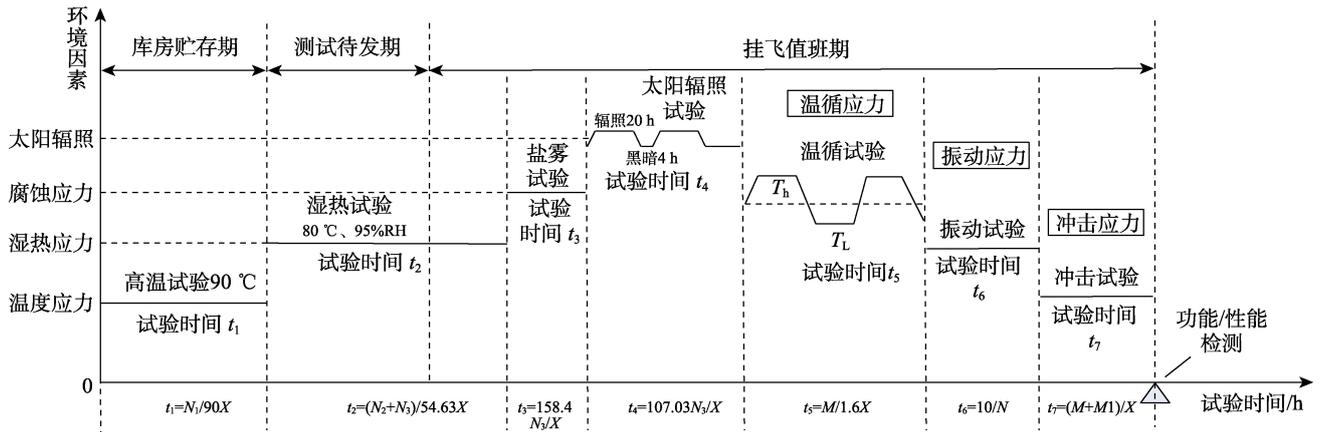


图7 等效  $N/X$  贮存期的复杂环境应力加速试验剖面  
 Fig.7 Accelerated test profile of complex environmental stress for storage period equivalent to  $N/X$

### 5 结语

本文研究了复杂环境应力下机电产品贮存-值班寿命加速试验方法，依据机电产品贮存-值班寿命剖面、环境因素及基准条件，考虑关键部件可能产生的环境效应与累积损伤，选取拟模拟与加速的环境因素，按照环境应力施加时序及损伤模型，制定了机电产品贮存-值班寿命加速试验剖面。

1) 提出一种综合考虑机电产品贮存-值班过程中温度、湿热、盐雾、太阳辐照、温度循环、振动和冲击等环境应力对机电产品寿命影响的加速试验方法。

2) 复杂环境应力下机电产品贮存-值班寿命加速试验充分考虑了机电产品在贮存-值班过程中经历的环境应力，能够在一定程度表征各种环境应力的累积叠加效应。

#### 参考文献：

[1] 张国龙, 蔡金燕, 梁玉英, 等. 电子装备多应力加速退化试验技术及可靠性评估方法研究[J]. 航空学报, 2013, 34(12): 2815-2822.  
 ZHANG G L, CAI J Y, LIANG Y Y, et al. Research on Reliability Assessment Method of Electronic Equipment Based on Multi-Stress ADT[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(12): 2815-2822.

[2] 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.  
 ZHANG S P, LI H M, ZHAO P F. Accelerated Testing Technology System for Storage Life of Missile Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 92-96.

[3] 张文广, 贺东旭, 李浩瀚, 等. 机电产品加速贮存试验与寿命评估方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(5): 528-535.  
 ZHANG W G, HE D X, LI H H, et al. Accelerated Storage Test and Life Evaluation Method of Electromechanical Products[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engi-

neering, 2021, 38(5): 528-535.

[4] 王浩伟, 滕克难, 吕卫民. 导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1004-1016.  
 WANG H W, TENG K N, LYU W M. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016.

[5] 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.  
 QIN Q, ZHANG S P. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 81-87.

[6] 陈津虎, 朱曦全, 胡彦平, 等. 航天电子产品加速贮存试验技术综述[J]. 强度与环境, 2015, 42(5): 11-18.  
 CHEN J H, ZHU X Q, HU Y P, et al. Summarization on Space Electronic Products Accelerated Storage Test Technology[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(5): 11-18.

[7] 刘佩凤, 王毅飞, 白明明, 等. 电子整机加速贮存试验及寿命评估方法研究[J]. 强度与环境, 2018, 45(1): 57-62.  
 LIU P F, WANG Y F, BAI M M, et al. Study on Storage Accelerated Aging Test and Life Assessment of Assembly Product[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(1): 57-62.

[8] 张仕念, 杨维忠, 夏克寒, 等. 一种基于综合环境剖面的导弹设备上设备加速贮存试验方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 60-65.  
 ZHANG S N, YANG W Z, XIA K H, et al. Accelerated Storage Test Method for Missile Equipment Based on Comprehensive En-Vironmental Profile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 60-65.

[9] 陈文华, 冯红艺, 钱萍, 等. 综合应力加速寿命试验方案优化设计理论与方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 101-105.  
 CHEN W H, FENG H Y, QIAN P, et al. Theory & Method for Optimum Design of Accelerated Life Test Plan under Multiple Stresses[J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2006, 42(12): 101-105.
- [10] 杨策, 李鸿志, 姚金勇. 机电产品加速贮存寿命试验评估方法[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 110-114.  
YANG C, LI H Z, YAO J Y. An Evaluation Method of Accelerated Storage Life Test for Mechanical and Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 110-114.
- [11] 张策, 王冬, 刘艳, 等. 防空导弹的综合环境可靠性试验剖面研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(5): 48-52.  
ZHANG C, WANG D, LIU Y, et al. Antiaircraft Missile Combined Environmental Reliability Test Profile Research[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(5): 48-52.
- [12] 周洁, 姚军, 苏泉, 等. 综合应力加速贮存试验方案优化设计[J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1202-1211.  
ZHOU J, YAO J, SU Q, et al. Optimum Design of Accelerated Storage Test Plan under Multiple Stresses[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1202-1211.
- [13] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831.  
LI X Y, JIANG T M. Review of Multiple-Stress Models in Accelerated Life Testing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 828-831.
- [14] 查国清, 黄小凯, 康锐. 基于多应力加速试验方法的智能电表寿命评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2217-2224.  
ZHA G Q, HUANG X K, KANG R. Smart Meter Lifetime Evaluation Based on Multi-Stress Acceleration Test Method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(12): 2217-2224.
- [15] 陈津虎, 胡彦平, 周芳. 舰载装备值班寿命加速试验方法研究[J]. 强度与环境, 2021, 48(2): 59-63.  
CHEN J H, HU Y P, ZHOU F. Research on Accelerated Life Test Method of Shipboard Equipment on Duty[J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(2): 59-63.
- [16] 蔡健平, 张萌, 赵婉. 舰载导弹武器全寿命期环境剖面确定方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 92-96.  
CAI J P, ZHANG M, ZHAO W. Determination Method of Life Cycle Environmental Profile for Shipboard Missile Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 92-96.
- [17] 吴超云, 明志茂, 黄英龄. 舰载装备环境剖面构建及环境要求分析[J]. 国防科技工业, 2016(2): 45-46.  
WU C Y, MING Z M, HUANG Y L. Construction of Ship Equipment Environmental Profile and Analysis of Environmental Requirements[J]. Defence Science & Technology Industry, 2016(2): 45-46.
- [18] 高松, 滕克难, 赵建印, 等. 温湿度因子对舰载导弹发射箱可靠性的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1): 101-105.  
GAO S, TENG K N, ZHAO J Y, et al. Influence of Temperature and Humidity Factor on the Reliability of Shipborne Missile Launcher[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(1): 101-105.
- [19] 祝学军. 战术弹道导弹贮存延寿工程基础[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.  
ZHU X J. Engineering Foundation of Tactical Ballistic Missile Storage and Life Extension[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2015.
- [20] 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.  
SHEN Z G, YUAN J C, DONG J Y, et al. Research on Acceleration Factor Estimation Method of Accelerated Life Test of Missile-Borne Equipment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1948-1952.
- [21] 中央军委装备发展部. 战术导弹贮存加速试验方法: GJB 10786—2022[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2022.  
Equipment Development Department of the Central Military Commission. Accelerated Storage Testing Methods for Tactical Missile: GJB 10786—2022[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2022.
- [22] 董宝旭. 继电器类单机加速贮存试验及可靠性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
DONG B X. Study on Accelerated Storage Test and Reliability Evaluation of Relay Single Machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [23] 陆博. 基于加速退化试验的RV减速器寿命预测方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.  
LU B. Life Prediction Method of RV Reducer Based on Accelerated Degradation Test[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [24] 赵蕾, 陈龙, 谢阳, 等. 电机控制器电子器件可靠性研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(18): 142-144.  
ZHAO L, CHEN L, XIE Y, et al. Research on Reliability of Motor Controller Electronics[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(18): 142-144.
- [25] 张天宇, 何宇廷, 李昌范, 等. 盐雾加速腐蚀与沿海大气环境的腐蚀等效关系研究[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 596-601.  
ZHANG T Y, HE Y T, LI C F, et al. Study on the Equivalence Relation between the Accelerated Corrosion of Salt Spray and the Coastal Atmospheric Environment[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(3): 596-601.
- [26] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.  
ZHAO P F, SU X Q, WU J S. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.