

# 星载无源微波器件加速寿命试验方法研究

魏彦江, 周祎, 杨光, 敬小东, 官朝晖, 雷鸣

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

**摘要:** **目的** 为星载无源微波器件能够在地面通过加速寿命试验验证其在轨可靠性和寿命提供理论依据和试验方法。**方法** 设计一种温度和功率同时作用下的双应力加速寿命数学模型, 通过分析加速应力与寿命的对应关系, 设计科学合理的加速寿命试验方案, 通过分析加速寿命试验下器件指标的变化, 给出器件可靠性和寿命评估结果。**结果** 以某隔离器这一典型无源微波器件为例, 在选取激活能 0.8 eV 下, 利用温度-功率双应力加速寿命数学模型, 计算得隔离器要满足 10 a 的在轨寿命和可靠性, 加速寿命试验时间需不低于 1230 h。通过 1300 h 以上的加速寿命试验, 对比试验前后隔离器指标, 隔离器的正向损耗恶化了 0.07 dB, 说明加速寿命试验对产品电性能老化有一定影响, 但指标变化均在技术要求范围内, 产品能够满足可靠性和寿命要求。**结论** 设计的温度-功率双应力加速寿命数学模型和加速寿命试验方案, 能够为星载无源微波器件高可靠长寿命验证提供参考和借鉴。

**关键词:** 无源微波器件; 双应力; 加速寿命试验; 高可靠长寿命; 广义艾林模型

中图分类号: V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0045-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.008

## Research on Accelerated Life Test Method of Spaceborne Passive Microwave Devices

WEI Yan-jiang, ZHOU Yi, YANG Guang, JIN Xiao-dong, GUAN Zhao-hui, LEI Ming

(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to provide theoretical basis and test method for verifying the reliability and life of passive microwave devices of satellites in orbit through accelerated life test on the ground. A mathematical model of double stress accelerated life was designed under the simultaneous action of temperature and power. By analyzing the corresponding relationship between accelerated stress and life, a scientific and reasonable accelerated life test scheme was designed. By analyzing the changes of device index in accelerated life test, the reliability and life evaluation results are given. Taking a typical passive microwave device-isolator as an example, under the selected activation energy of 0.8 eV, using the temperature-power dual stress accelerated life mathematical model, it is calculated that the accelerated life test time needs to be not less than 1230 h for the isolator to meet the 10 a in-orbit life and reliability. Through accelerated life test for more than 1300 hours, comparing the isolator indexes before and after the test, the forward loss of isolator deteriorates by 0.07 dB, indicating that the accelerated life test has certain influence on the electrical performance aging of products, but the index changes are within the technical requirements, indicating that the products can meet the requirements of reliability and life. The designed temperature-power dual stress accelerated life

收稿日期: 2021-04-22; 修订日期: 2021-05-20

Received: 2021-04-22; Revised: 2021-05-20

作者简介: 魏彦江(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星导航与通信、星载功率放大器和无源微波器件。

**Biography:** WEI Yan-jiang (1982—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: satellite navigation and communication, spaceborne power amplifier, passive microwave devices.

引文格式: 魏彦江, 周祎, 杨光, 等. 星载无源微波器件加速寿命试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 045-051.

WEI Yan-jiang, ZHOU Yi, YANG Guang, et al. Research on accelerated life test method of spaceborne passive microwave devices[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 045-051.

mathematical model and accelerated life test scheme can provide reference for high reliability and long life verification of spaceborne passive microwave devices.

**KEY WORDS:** passive microwave device; dual stress; high reliability and long life; accelerated life test; generalized Eyring model

星载无源微波器件是航天器有效载荷系统的重要组成部分,包括隔离器、环形器、微波开关、滤波器、多工器等多种类型。随着航天器在轨使用寿命要求越来越长,无源微波器件高可靠、长寿命指标也越来越高。目前,高、中轨卫星要求无源微波器件寿命至少在 10 a 以上<sup>[1]</sup>。高可靠性是设计出来的,但怎样验证产品的可靠性和长寿命也非常重要。一方面,星载器件产品的样本数量比较少;另一方面,产品价格比较昂贵。如何在短时间、小样品数下来验证产品能够满足在轨 10 a 以上长寿命具有重要工程意义,因此开展加速寿命试验研究工作势在必行<sup>[2]</sup>。

### 1 失效机理和薄弱环节

要想对无源微波器件进行加速寿命试验,首先要看该产品是否具有加速性,即产品失效机理的一致性如何<sup>[3]</sup>,失效过程是否规律,产品是否服从同样的寿命分布。加速寿命试验设计之初,要先对产品失效机理和薄弱环节进行分析<sup>[4]</sup>。

某型号星载隔离器产品如图 1 所示。该产品在卫星有效载荷系统中位于功率放大器之后,主要对功率放大器进行保护,防止大功率反射对功率放大器造成损坏,改善功率放大器输出驻波。要求产品能长时间稳定地正向通过大功率微波信号,能吸收大功率反射信号。隔离器失效机理和薄弱环节分析,主要基于星载隔离器的故障模式影响分析(FMEA),明确影响其可靠性的薄弱点和关键元器件,通过对关键元器件的失效机理分析,评估其是否具备加速寿命试验的要求。

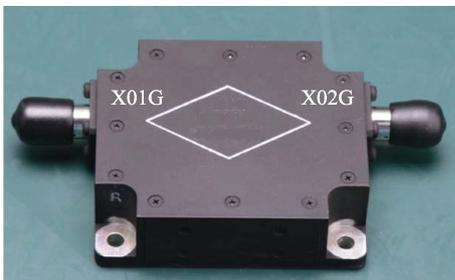


图 1 某星载隔离器实物 Fig.1 A space isolator

隔离器功能层次与结构层次如图 2 所示。根据分析隔离器的功能、结构、材料、工艺等多个维度的 FMEA,此隔离器的薄弱环节主要为连接器焊点、介质和电阻器。连接器焊点的寿命与通过功率的容量成反比,主要失效机理是隔离器通过功率过高,造成焊

点温度过高熔化或低气压放电。介质的寿命与温度成反比,与气压成正比,主要失效机理是温度过高、气压过低,造成热真空释气,从而引起介质的介电常数和介电损耗正切发生变化,最终影响电路的匹配,使隔离器性能下降。电阻器的寿命与温度、通过功率的容量成反比,主要失效机理是温度过高造成阻值变化,通过功率过高造成电阻烧毁。

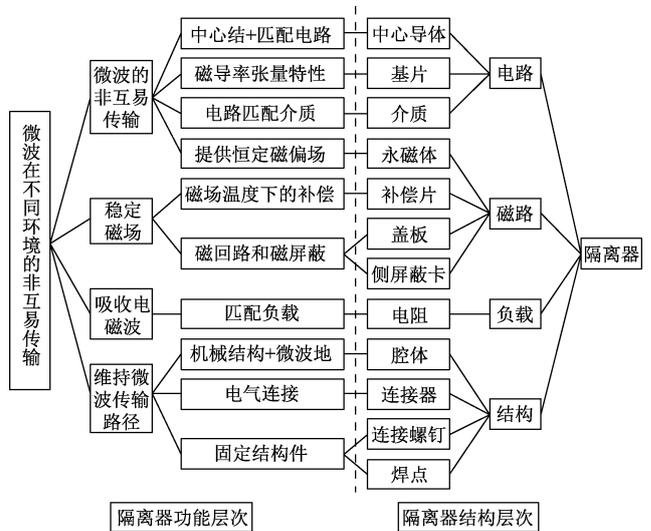


图 2 隔离器功能层次与结构层次 Fig.2 The function and structure level of isolator

由此可见,影响隔离器的连接器焊点、电阻器、介质寿命的因素主要为温度和功率。可以通过对隔离器施加温度应力和功率应力来加速隔离器的性能退化,从而预测隔离器的可靠性和寿命。

### 2 加速寿命试验数学模型

美国罗姆航展中心在 1967 年对加速寿命试验给出了统一定义。加速寿命试验是指基于合理的工程假设与建立在与失效物理法则有关的统计模型的基础上的合理的统计假设,将通过经济且准确的手段在很短的时间内产生的可靠性信息转化成试验研究对象在额定的应力水平下操作时的可靠性特征值的定量可重复的试验方法<sup>[5]</sup>。简言之,加速寿命试验保持了失效机理不变的条件,加大试验应力来缩短了试验周期,采用加速应力水平来进行产品的寿命试验,从而缩短试验时间,提高试验效率,降低了试验成本。加速寿命试验属于统计试验范畴,试验中对产品所加的应力,可以是温度、湿度、电压、电流、功率和机械应力等<sup>[6-8]</sup>。

目前, 加速寿命试验主要有以下几种类型: 恒应力加速寿命试验、序进应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验、循环应力加速寿命试验和随机应力加速寿命试验<sup>[9]</sup>。恒应力加速寿命试验的理论和方法都比较成熟, 统计结果精度相对较高, 一般要求样本数较多, 试验时间比较长。序进应力加速寿命试验的时间比较短, 样本数也少, 但是其统计和处理方法不够成熟, 试验精度不高, 并且对试验设备的要求也很高, 试验成本高。步进应力加速寿命试验虽然试验时间短、样本数少, 但是对试验前的参数优化要求高, 往往一个新产品很难掌握初始应力。另外, 对应力的步进量也需要合理设置, 否则也比较难以获得理想的试验结果。循环应力加速寿命试验对试验设备要求高, 且试验的理论与统计分析方法尚处于摸索和发展阶段, 限制了其应用范围。随机应力加速寿命试验对试验设备要求极高, 试验理论和试验数据的处理方法都处于发展初期, 在工程实践中大多用恒定应力来替代<sup>[10-16]</sup>。文中综合产品特点, 选择采用恒定应力加速寿命试验, 并且为了能够提供试验效率, 设计了多应力加速试验模型。

产品在工作过程中经受的环境应力是非常复杂的, 对电子产品来说, 会受到温度、电应力、振动和湿度等应力的影响。这些应力的综合效果就影响了产品的使用寿命, 因此在加速寿命试验中, 多应力加速模型的建立有很高的研究和应用价值。但多应力环境是极其复杂的, 不可能将它们同时都和产品的寿命联系起来, 不同应力之间的耦合作用也是相当复杂的。为了简化问题, 常常针对不同产品只考虑对其影响最大的几种应力<sup>[17]</sup>。

电子产品的寿命主要是受到温度和电应力的影响, 当今多应力模型研究的一个主要趋势就是研究器件级的温度和电应力加速模型。由于电子器件结构本身相对简单, 所以最简单也最常用的一种方法就是忽略应力间的相互影响, 将单应力加速模型相乘, 直接得到温度电应力的加速模型<sup>[18]</sup>。根据以上分析, 温度与寿命的关系服从阿伦尼斯模型 (Arrhenius), 电应力与寿命的关系服从逆幂率模型 (Inverse), 忽略应力之间的影响, 可以直接相乘得到多应力模型<sup>[19-20]</sup>。

隔离器的寿命与温度、功率之间多应力影响变化相关, 可用广义艾林模型的化学反应速度方程<sup>[21]</sup> (1) 给出:

$$R(T, S) = R_0 f_1 f_2 R \quad (1)$$

式中:  $T$  为温度应力;  $S$  为功率应力;  $f_1$  为考虑到由于非温度应力的存在而对能量分布调整的修正因子,  $f_1 = e^{CS}$ ;  $f_2$  为考虑到由于非温度应力的存在对激活能调整的修正因子,  $f_2 = e^{DS/kT}$  ( $C$  为待定常数;  $D$  为待定常数);  $R_0$  为当只有温度应力时的艾林模型, 如式 (2) 所示。

$$R_0 = Ae^{-E/(kT)} \quad (2)$$

式中:  $R_0$  表示在温度为  $T$  时的反应速度;  $E$  为物质在温度  $T$  时的激活能;  $k$  为玻尔兹曼常数,  $k = 0.8617 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ;  $A$  为试验待定常数;  $T$  为热力学温度。

因此, 式 (1) 可以表示为式 (3):

$$R(T, S) = Ae^{-E/(kT)} e^{(C+D)/(kT)S} \quad (3)$$

如果将隔离器功率应力和温度应力之间相互影响的因素不予考虑, 则功率应力不对温度应力的激活能产生影响, 因此式 (3) 中的常数  $D$  为 0, 则式 (3) 可以表示为:

$$R(T, S) = Ae^{-E/(kT)} e^{CS} \quad (4)$$

从式 (4) 中可以看出, 当假设功率应力和温度应力不相互作用, 温度应力对隔离器寿命的影响服从阿伦尼斯模型要素, 而功率应力对隔离器寿命的影响服从逆幂律模型要素 (即功率应力只对隔离器产品的材料制造特性产生影响, 从而可以用恒定温度下电压对数来表示, 即逆幂律模型)。式 (4) 即为温度-功率双应力加速寿命数学模型。

通过式 (4) 可知, 隔离器的加速寿命试验中的加速系数可表示为:

$$AF = Ae^{\frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} e^{C(S_2 - S_1)} \quad (5)$$

其中,  $e^{C(S_2 - S_1)}$  表示在功率应力 2 条件下, 相对功率应力 1 条件下对隔离器产品寿命的加速影响。在实际工程中, 该加速影响是非常难以得到准确数值的, 因为微波功率对产品特性的影响因素非常复杂。如对产品功率传输线材料表面的化学变化而引起的传输特性变化, 对非金属材料的形变或释气, 从而影响产品耐受电场强度的变化等。因此, 在工程应用中, 可以将功率应力影响进行简化设计。在服从逆幂律和指数寿命数学特性条件下, 功率应力模型简化为  $e^V$ , 其中  $V$  表示产品加载功率量值相比额定功率量值的比值。同理, 该简化模型同样适用于电压应力模型, 前提是电压应力对产品寿命影响也是服从逆幂律模型和指数寿命。

对于加速寿命模型, 当加速应力水平高于产品额定工作水平时, 属于加速寿命工作,  $V$  取值大于 1; 当加速应力水平等于或者低于产品额定工作水平时, 此时不属于加速寿命工作, 对产品寿命不影响, 因此  $V$  取值等于 0。

简化后, 加速系数可以表示为:

$$AF = Ae^{\frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} e^V \quad (6)$$

式 (6) 即为隔离器加速寿命试验采用的双应力加速模型中的加速系数公式, 作为加速寿命试验和寿命评估的数学理论依据。

### 3 加速寿命试验方案

#### 3.1 加速应力

加速寿命试验的应力水平选择非常重要,应该高于产品规范,但不应超过产品工作极限,以保障产品失效机理一致,而不引入新的失效模式和机理,如图3所示。

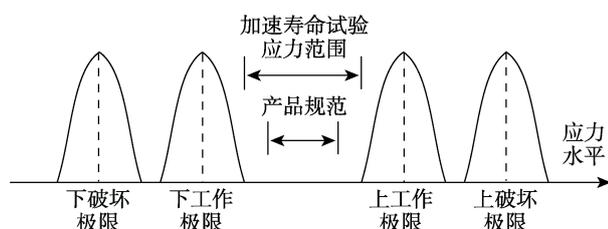


图3 加速寿命试验应力范围<sup>[18]</sup>

Fig.3 Stress range of accelerated life test<sup>[18]</sup>

对隔离器进行加速寿命试验,验证其是否满足在轨10a以上的寿命要求。综合考虑隔离器产品在轨工作特性及目前地面加速试验的条件,在试验方案中进行双应力(温度应力和功率应力)加速寿命试验。采用双应力加速寿命试验可以在维持产品正常工作的失效机理的前提下,加速试验时间,减少试验成本。

对于温度应力的选择,由于隔离器实际在轨工作温度低于35℃,技术指标中要求隔离器的鉴定级温度为70℃,考虑产品要满足在鉴定级温度条件下达到一级降额设计,所以温度应力选择为70℃。这个温度已经远远高于在轨正常工作温度,而且不超过产品鉴定级温度要求,也可以保证产品不会因为过温度应力带来损害而影响有效判断在轨工作10a的寿命。通过数学模型分析及隔离器产品本身热设计的仿真,选择70℃试验温度作为加速的温度应力,满足该加速寿命试验的需求。

对于功率应力的选择,由于隔离器实际在轨工作时的承受功率低于150W,产品技术指标中额定功率要求为180W,功率耐受要求为215W。选择215W的功率水平作为加速寿命试验中功率加速应力,是产品在轨正常工作功率水平的1.4倍,即使按照产品额定功率180W的水平,也已经达到了其1.2倍的水平。同理,本加速寿命试验不是极限应力试验,选择既不偏离产品实际设计和降额使用的合理指标范围,又在指标范围内选取合理的加速应力水平,控制试验的加速量级,在现有时间、财力、物力、人力的范围内,得到合理、可行、可信的加速试验判据结果。

#### 3.2 试验时间

隔离器加速寿命试验需要合理的试验时间来反应产品经过加速寿命试验后满足在轨工作10a以上的寿命指标,该试验时间取决于加速系数的确定。由数学模型加速系数公式(6)可知,需要确定激活能

的数值。由于隔离器属于无源微波器件,国内外文献资料均没有给出该类产品的激活能数值,参考MIL-HDBK-338B《电子设备可靠性设计手册》和ECSS-Q-HB-30-01A《最坏情况分析》中对各种电子元器件的激活能给出的取值,隔离器加速寿命试验的激活能取值为0.8eV。

隔离器加速寿命试验的试验参数中,温度应力为70℃,功率应力为215W;隔离器的额定工作参数中,温度应力为35℃,功率应力为180W,激活能选取为0.8eV。将数值带入式(6)得: $T_1=308.16\text{K}$ , $T_2=343.16\text{K}$ , $V=1.19$ 。求解出加速系数 $AF=71.32$ 。

产品预计寿命和加速寿命试验时间的对应关系见表1。从表1中可以看出,加速寿命试验选择1300h即可满足产品在轨工作10a以上的寿命预计。由于加速寿命试验采取的数学模型中,对激活能的选择和双加速应力的影响进行了简化和保守计算,所以隔离器真实在轨工作寿命远远优于加速寿命试验中得出的结果。

表1 产品预计寿命和加速试验时间的对应关系

Tab.1 Correspondence between product life and accelerated test life

序号	试验时间/h	寿命/a
1	1000	8.1
2	1230	10
3	1300	10.5
4	1400	11.4
5	1500	12

根据隔离器产品的特性及失效模式,隔离器在经过加速寿命试验后,常温电性能指标满足如下要求:正向功率加载情况下正向损耗增加不超过0.3dB,驻波不超过1.35,可以判断为隔离器能够满足在轨10a以上工作寿命指标要求。

在现有的试验条件和数学模型可信度下,采取本试验方案中的加速寿命试验是合理可行的,对于星载无源微波器件的寿命研究具有工程研究价值。

#### 3.3 试验系统

试验系统各组成部分见表2。隔离器加速寿命试验系统如图4所示。加速寿命试验温度监测布局如图5所示。

### 4 加速寿命试验结果

按照图3所示方案搭建加速寿命试验场景,如图6和图7所示。利用温箱自带的温度传感器按照图5所示对隔离器温度进行监测,监测软件界面如图8所示,温度数据如图9所示。设计了自动测试软件对输入和反射功率进行监测,如图10和图11所示。

表 2 试验系统组成  
Tab.2 Test system composition

序号	仪器名称	用途
1	信号源	产生所需要测试频率的连续波信号，作为功率放大器的输入激励信号
2	功率放大器	将输入激励信号进行放大，达到所需要的功率量级
3	双定向耦合器	将正向输入功率和反向反射功率耦合输出，用来检测大小
4	双路功率计	测试正向功率和反射功率的大小
5	矢量网络分析仪	测试隔离器 S 参数
6	大功率负载	吸收功率，转化为热量
7	温箱	提供被测件试验所需的环境温度
8	散热系统	在环境温度中，对被测件的安装表面温度进行控制，使得被测件在安全温度范围内工作
9	温度监测	对温箱控制温度，散热底板温度及被测件温度进行监测，确定被测点温度满足试验要求

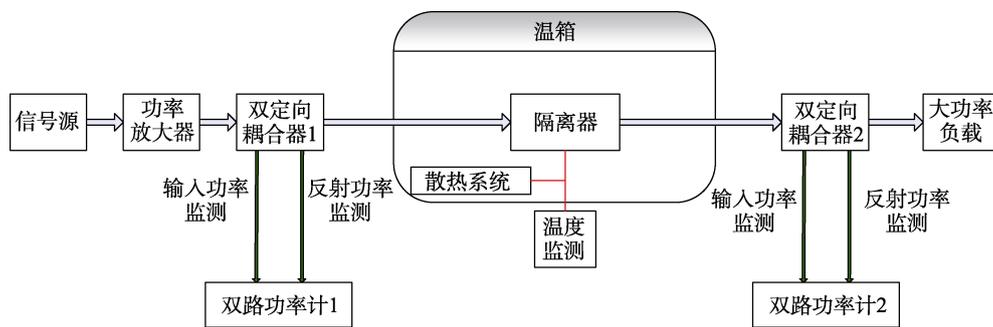


图 4 加速寿命试验系统  
Fig.4 Accelerated life test system

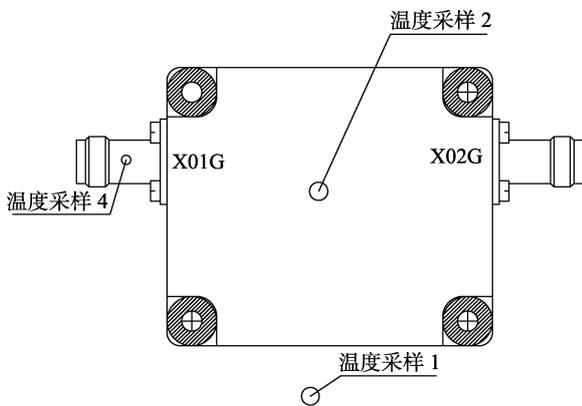


图 5 加速寿命试验温度监测  
Fig.5 Temperature monitoring for accelerated life testing



图 7 加速寿命试验场景 2  
Fig.7 Real scene 2 of accelerated life test



图 6 加速寿命试验场景 1  
Fig.6 Real scene 1 of accelerated life test



图 8 温度监测界面  
Fig.8 Temperature monitoring interface

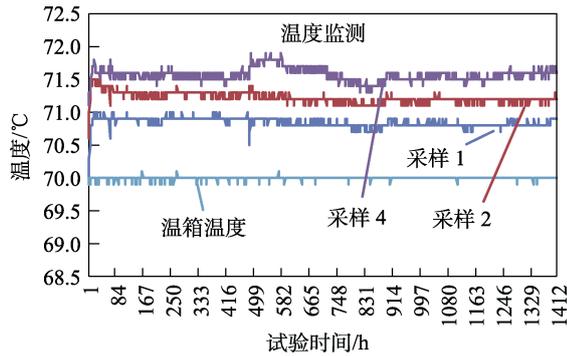


图 9 温度监测数据  
Fig.9 Temperature monitoring data

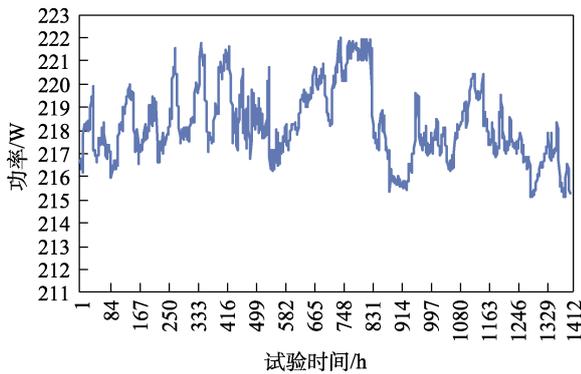


图 10 输入功率监测数据  
Fig.10 Input power monitoring data

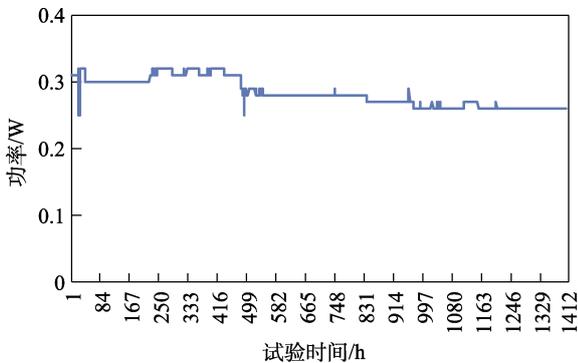


图 11 反射功率监测数据  
Fig.11 Reflected power monitoring data

从温度监测数据中可以看出，在温箱温度为 70 °C 时，隔离器外表面温度不超过 71.5 °C，隔离器连接器表面温度不超过 72 °C，并且温度能够达到热平衡，隔离器工作状态稳定。从隔离器输入功率监测数据来看，隔离器输入功率为 215~222 W，波动主要是由于功率放大器输出功率波动引起的，属于正常波动范围。从隔离器反射功率监测数据来看，反射功率在 0.26~0.32 W 变化，主要是由于输入功率波动引起的，属于正常变化范围。

加速寿命试验表明，隔离器在 70 °C 环境中，承受大于 215 W 连续波功率连续工作超过 1300 h 后，产品工作正常稳定，性能指标合格，顺利通过试验设定的考核过程。试验数据结合加速数学模型表明，被

试产品满足型号项目中长寿命高可靠的要求，能够满足在轨工作 10 a 以上的要求。

从隔离器加速寿命试验前后，正向损耗、反向损耗、电压驻波比和额定功率容量指标（见表 3）来看，试验前后指标变化均在技术指标要求合格范围内，并且变化范围都比较小。其隔离器正向损耗变化了 0.07 dB，说明加速寿命试验对产品电性能老化有一定影响。正是由于隔离器指标设计余量较大，加速寿命试验之后，产品依然能够满足性能指标要求，也说明隔离器能够满足在轨工作 10 a 的寿命指标。

表 3 加速寿命试验前后性能指标对比

Tab.3 Performance index comparison before and after accelerated life test

序号	指标名称	指标要求	试验前	试验后
1	正向损耗/dB	≤0.35	0.18	0.25
2	反向损耗/dB	≥20	21.7	21.7
3	电压驻波比	≤1.3	1.08	1.09
4	功率容量/W	优于 180	优于 180	优于 180

## 5 结语

文中以某型号星载隔离器为例，通过建立温度应力和功率应力双应力同时作用的双应力加速退化模型，设计了合理可行的加速寿命试验，为星载无源微波器件高可靠长寿命验证提供了参考和借鉴。当然，本次加速寿命试验样本少，置信度偏低，在研究过程中，引入了一些假设，对模型进行了一定的简化以满足工程可操作性，试验结果仅供参考。课题组将继续深入研究，结合在轨产品实际工作情况，不断修正模型，使可靠性评估结果更加准确。

## 参考文献:

- [1] 薛毅, 张志国, 伍招冲. 关于卫星设计寿命的思考[J]. 中国航天, 2017(6): 26-28.  
XUE Yi, ZHANG Zhi-guo, WU Zhao-chong. Reflections on the design life of satellites[J]. Aerospace China, 2017(6): 26-28.
- [2] 董澍, 张亮, 刘春雷, 等. 星上单机级电子产品加速寿命试验方法研究[J]. 质量与可靠性, 2013(5): 6-9.  
DONG Shu, ZHANG Liang, LIU Chun-lei, et al. Research on accelerated life test method of single-stage electronic products on satellite[J]. Quality and reliability, 2013(5): 6-9.
- [3] 郭春生, 谢雪松, 马卫东, 等. 加速试验中失效机理一致性的判别方法[J]. 半导体学报, 2006, 27(3): 560-563.  
GUO Chun-sheng, XIE Xue-song, MA Wei-dong, et al. A failure-mechanism identification method in accelerated testing[J]. Chinese journal of semiconductors, 2006, 27(3): 560-563.

- [4] 张苹苹. 加速寿命试验方法及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学可靠性工程研究所, 1986.  
ZHANG Ping-ping. Study and application of accelerated life test[M]. Beijing: Institute of Reliability Engineering of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1986.
- [5] 黄燕玲. 改进的陈氏分布下的序加和序降寿命试验统计分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.  
HUANG Yan-ling. Statistical analysis of progressive and descending life test based on the modified Chen's distribution[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018.
- [6] 陈循, 陶俊勇, 张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4): 29-32.  
CHEN Xun, TAO Jun-yong, ZHANG Chun-hua. Reliability enhancement testing and accelerated life testing: An introductory review[J]. Journal of national university of defense technology, 2002, 24(4): 29-32.
- [7] 张志华. 加速寿命试验及统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002:35-40.  
ZHANG Zhi-hua. Accelerated life test and statistical analysis[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002:35-40.
- [8] 张苹苹. 航空产品加速寿命试验研究及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(4): 124-129.  
ZHANG Ping-ping. Study and application of accelerated life test for aviation products[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 21(4): 124-129.
- [9] 张春华, 温熙森, 陈循. 加速寿命试验技术综述[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 485-490.  
ZHANG Chun-hua, WEN Xi-sen, CHEN Xun. A comprehensive review of accelerated life testing[J]. Acta armamentarii, 2004, 25(4): 485-490.
- [10] DEVARAJAN K, EBRAHIMI N. A nonparametric approach to accelerated life testing under multiple stresses [J]. Naval research logistics, 1998, 45(6): 629-644.
- [11] BAI D S, LEE N Y. Nonparametric estimation for accelerated life tests under intermittent inspection[J]. Reliability engineering & system safety, 1996, 54(1): 53-58.
- [12] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
MAO Shi-song, WANG Ling-ling. Accelerated life testing[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [13] 陈文华. 航天电连接器可靠性试验和分析的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.  
CHEN Wen-hua. Research on reliability test and analysis of aerospace electrical connector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1997.
- [14] 刘俊俊. 电连接器贮存可靠性加速寿命试验的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.  
LIU Jun-jun. Research on accelerated life test of electrical connectors storage reliability[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2010.
- [15] 和阳, 王蓉华, 徐晓岭. 累积损伤下 Lomax 分布产品序进应力加速试验分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(5): 42-48.  
HE Yang, WANG Rong-hua, XU Xiao-ling. The analysis of progressive stress accelerated life test for Lomax distributed products under cumulative damage[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2017, 35(5): 42-48.
- [16] 和阳, 王蓉华, 徐晓岭. 累积损伤模型下 Lomax 分布产品序进-恒定加速试验分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(6): 53-57.  
HE Yang, WANG Rong-hua, XU Xiao-ling. The analysis of progressive-constant stress accelerated life test for Lomax distributed products under cumulative damage model[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2017, 35(6): 53-57.
- [17] 景诗毅. 电动汽车驱动系统可靠性研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.  
JING Shi-yi. Research on reliability of driver system for electric vehicle[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [18] 景诗毅. STATCOM 装置的可靠性研究[J]. 机电一体化, 2011, 17(11): 55-59.  
JING Shi-yi. Study of STATCOM device reliability[J]. Mechatronics, 2011, 17(11): 55-59.
- [19] 戴树森. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.  
DAI Shu-sen. Reliability test and statistical analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983.
- [20] 姜仁元, 张兴唐, 杨亦春. 温度应力下功能退化型加速寿命试验问题研究[J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(6): 523-527.  
JIANG Ren-yuan, ZHANG Xing-tang, YANG Yi-chun. Study on accelerated life test of function degenerating type by temperature stress[J]. Journal of Nanjing university of science and technology, 2000, 24(6): 523-527.
- [21] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
JIANG Tong-min. Reliability and life test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.