

铌酸锂调制器加速贮存寿命评估

周超超, 卫炆, 霍光, 孙国明, 谢良平, 李县洛, 严吉中

(西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究铌酸锂调制器加速储存寿命的评估方法。**方法** 基于韦布尔分布的方法,应用加速老化寿命评估试验理论和技术,建立恒加速应力老化寿命评估的理论模型。对集成光学调制器在不同温度应力下的加速贮存寿命进行统计,分析不同时间段器件失效概率,对其可靠性进行评估。**结果** 计算出了器件韦布尔分布的形状参数 m 为0.314,表明调制器贮存时早期失效多。**结论** 通过对器件失效数据进行分析,确定了阿伦尼斯加速模型,并计算其激活能为1.1 eV,分析得到在25 °C环境条件下LiNbO₃调制器器件贮存1年的可靠度为0.9454。

关键词: 调制器; 寿命评估; 阿伦尼斯模型; 激活能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.027

中图分类号: TJ85 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0149-05

Accelerated Storage Life Evaluation of Lithium Niobate Modulators

ZHOU Chao-chao, WEI Yang, HUO Guang, SUN Guo-ming, XIE Liang-ping,
LI Xian-luo, YAN Ji-zhong

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institution, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: Objective To study the evaluation method for accelerated storage Life of FOG. **Methods** Based on Weibull distribution, employing the accelerated aging life evaluating test theory and technique, this paper proposed a theoretical model for constant stress accelerated aging life evaluation. Then it evaluated the storage reliability and storage life of integration optical modulator under different temperature stress, and analyzed the failure probability of the device in different time periods. **Results** It was calculated that the M shape parameter of Weibull distribution device was 0.314, which showed that the modulator storage was dominated by early-satge failure. **Conclusion** By the analysis of failure data of modulator, the Arrhenius accelerating model was determined, and the activation energy was calculated to be 1.1eV. In the environmental condition of 25 °C, the reliability of 1-year storage of LiNbO₃ modulator was 0.9454.

KEY WORDS: modulator; life evaluation; Arrhenius accelerating model; activation energy

LiNbO₃晶体是一种光学性能优良的晶体材料,它具有高的电光系数和非线性系数及优良的波导光学性能,目前应用最为广泛的就是铌酸锂集成光学调

制器。在航空导航方面,它是光纤陀螺的关键器件之一^[1-3],因此它的可靠性至关重要。随着光纤陀螺应用领域的不断扩大,对其使用寿命、可靠性指标的

收稿日期: 2015-09-24; 修订日期: 2015-10-18

Received: 2015-09-24; Revised: 2015-10-18

作者简介: 周超超(1984—),男,湖北人,硕士,工程师,主要从事光纤器件开发等方面的研究。

Biography: ZHOU Chao-chao(1984—),Male,from Hubei,Master,Engineer,Research focus: development of optical fiber devices.

获知需求日益迫切。在实际型号研制工程中,订购方出于系统总体可靠性方面的考虑,常常要求准确了解光纤陀螺的可靠性指标。从可靠度模型角度而言,根据串联模型原理,任何一种产品的寿命都取决于该产品中最薄弱环节的寿命,一旦影响产品性能的某个关键元件或重要部件发生失效,该产品的寿命就被终结^[4-5]。国外关于该器件可靠性的研究有比较多的报道,但都不够系统^[6-7]。国内对铌酸锂调制器存储可靠性方面的研究尚不深入,因此铌酸锂调制器存储寿命的评估问题亟待解决。

对于高可靠性要求的航空航天光电产品,其存储寿命和使用寿命都有严格的要求。要获得这类产品的寿命一般的手段是通过传统的寿命统计方法,进行长期的检测,统计分析获得。韦布尔分布是可靠性中最常用的失效分布之一,许多电子机械的元器件与设计等产品的失效分布都是韦布尔分布。这种方法得

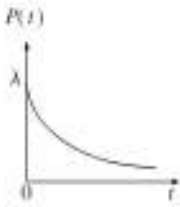
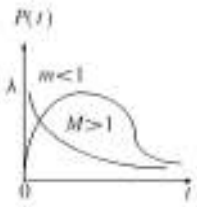
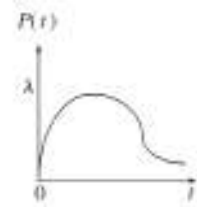
到的数据可信度高,但是所需要的周期很长。加速老化试验是在产品失效机理不变的前提下,加强产品应力条件来加速器件的老化失效,以此在较短的时间里获得产品的特征寿命信息。

由于铌酸锂调制器具有长寿命、高可靠性的特点,为了评估其贮存寿命与可靠性指标,采用加速退化试验的方法可以缩短试验时间,节约成本^[8-9]。因此,文中通过铌酸锂调制器加速贮存退化试验取得的试验数据,采用基于韦布尔分布的可靠性评估方法,对LiNbO₃集成光学调制器贮存寿命进行了评估。

1 模型分析

失效机理的研究对提高产品性能和寿命至关重要,常采用的失效分布有如下三种:指数分布、韦布尔分布、对数正态分布,见表1。

表1 失效分布
Table 1 Failure distribution

	指数分布	韦布尔分布	对数正态分布
密度函数 以及图形	$p(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ $t \geq 0$ 	$p(t) = \frac{mt^{m-1}}{\eta^m} e^{-(t/\eta)^m}$ $t \geq 0$ 	$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$ $t \geq 0$ 
参数范围	$\lambda > 0$	$m > 0, \eta > 0$	$-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$
分布函数	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t > 0$	$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^m}, t > 0$	$F(t) = \Phi((\ln t - \mu)/\sigma)$
均值E(T)平均寿命	$E(T) = 1/\lambda$	$E(T) = \eta \Gamma(1+1/m)$	$E(T) = \exp(\mu + \sigma^2/2)$
可靠度	$R(t) = \exp(-\lambda t), t > 0$	$R(t) = \exp(-t/\eta), t > 0$	$R(t) = 1 - \Phi((\ln t - \mu)/\sigma)$
失效函数	$\lambda(t) = \lambda$	$\lambda(t) = m/\eta(t/\eta)^{m-1}$	$\lambda(t) = p(t)/R(t)$

大量实践说明,凡是因某一局部失效而导致全局停止运行的元件、器件和设备等的寿命都可以看做近似服从韦布尔分布。

对于韦布尔分布,η称为特征寿命参数,m称为形状参数。当m<1时,早期失效较多;当m=1时,韦布尔分布就是指数分布,失效率为常数;当m>1时,韦布尔分布的密度函数呈单峰状态,失效率呈上升状态,m越大,失效率上升速度越快;当m≥3时,韦布尔分布近似对称状态,接近正态分布。

加速寿命试验采用加速应力方式对试件进行寿命试验,从而缩短了试验时间,提高了试验效率,降低

了试验成本。该试验方法使对高可靠、长寿命产品的可靠性评定成为可能^[8]。加速寿命试验通常分为三种类型,如图1所示。

在上述三种类型的加速寿命试验中,以恒定应力加速寿命试验的理论与方法更为成熟。加速寿命模型常用的有两种:阿伦尼斯模型和逆幂律模型。

在加速寿命试验中用温度作为加速应力是常见的,因为高温能使产品内部加快化学反应,促使产品提前失效^[10-13]。阿伦尼斯加速模型为:

$$\varepsilon = Ae^{E_a/KT} \tag{1}$$

式中:ε是寿命特征;A是常数;E_a是激活能,与材

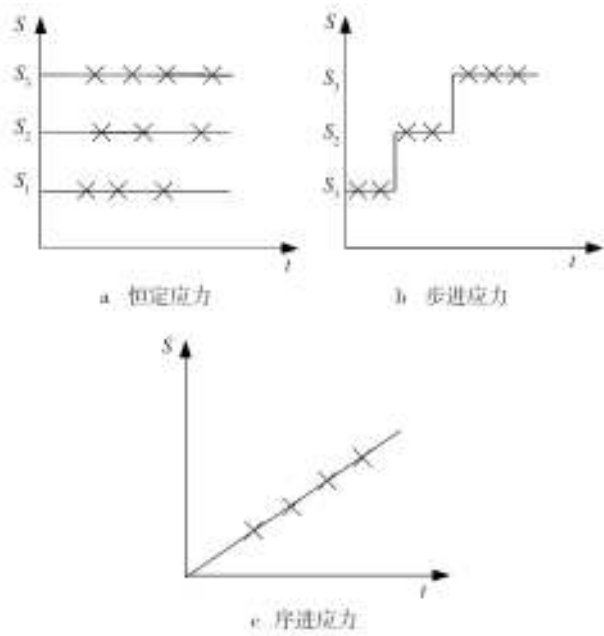


图1 加速寿命曲线

Fig.1 Accelerated life curves

料相关; K 是波尔兹曼常数; T 为绝对温度。

Arrhenius 将其经验公式中的 E_a 称为激活能, 其概念是基元反应中活化分子平均能量和非活化分子平均能量之差, 是衡量温度应力效果的重要参数。激活能 E_a 是器件从正常的未失效状态向失效状态转换过程中存在的势垒。激活能越小, 失效的物理过程越容易进行; 激活能越大, 加速因子越大, 产品越容易被加速而失效^[4]。

上述关系就是阿伦尼斯模型, 它表明寿命特征将随着温度的上升而按指数下降, 对模型两边取对数, 可得:

$$\ln \varepsilon = a + b/T \quad (2)$$

式中: $a = \ln A$, $b = E_a/K$ 。

式(2)表明, 寿命特征的对数是温度倒数的线性函数。于是对于阿伦尼斯模型和逆幂律模型可以用统一模型表示:

$$\ln \varepsilon = a + b \phi(S) \quad (3)$$

式中: $\phi(S)$ 为应力水平 S 的已知函数。如 S 为绝对温度时, $\phi(S) = 1/S$; 当 S 为电压时, $\phi(S) = \ln S$ 。

当产品的寿命服从韦布尔分布 $Wei(m, \eta)$ 时, 常用的特征寿命 η 作为寿命特征, 于是其加速模型就为:

$$\ln \eta = a + b \phi(S) \quad (4)$$

2 实例验证

下面利用上面的阿伦尼斯加速寿命模型, 在韦布

尔分布数据统计的基础上, 对 x 切 $LiNbO_3$ 集成光学调制器在某一特定应力条件下长期直流漂移引起的性能失效进行寿命评估。

在韦布尔分布场合寿命的统计分析中需要三个基本假设^[8]:

1) 在正常应力水平 S_0 和加速应力水平 $S_1 < S_2 < \dots < S_k$ 下产品的寿命服从韦布尔分布 $Wei(m_i, \eta_i)$, 其分布函数为:

$$F_i(t) = 1 - e^{-(t/\eta_i)^{m_i}} \quad t > 0 \quad (5)$$

式中: m_i 为形状参数; η_i 为特征寿命参数。

2) 在 S_0 和加速应力水平 S_1, S_2, \dots, S_k 下产品的失效机理不变, 由韦布尔分布的形状参数 m_i 反映失效机理。

3) 产品的特征寿命 η_i 与所施加加速应力 S_i 满足阿伦尼斯加速寿命模型:

$$\ln \eta_i = a + b \phi(S_i) \quad (6)$$

调制器初始偏置电压 $V(0) = 3.5$ V, 测试原理电路和相位输出如图2所示。在三种不同的温度应力下: $S_1 = 353$ K, $S_2 = 373$ K 和 $S_3 = 393$ K, 进行加速筛选试验, 每种应力下的样品个数分别为: $n_1 = 25$, $n_2 = 25$ 和 $n_3 = 25$, 每组试验进行 1500 h, 测试周期为: 5, 10, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 1000, 1500 h。

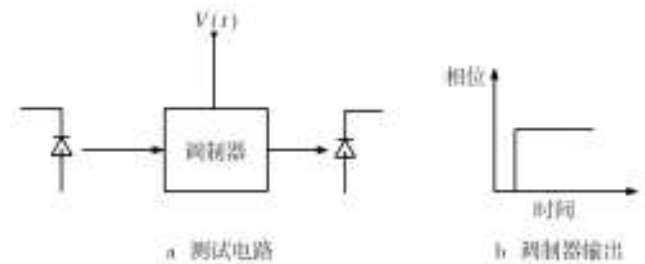


图2 测试原理

Fig.2 The principle diagram of the test

在时间 t , 器件的偏置电压变为 $V(t)$, 定义 $A(t) = V(t)/V(0)$, 当满足条件 $A(t) \geq 1.05$ 时, 定义器件失效。

表2为器件筛选统计数据, 利用韦布尔分布 $Wei(m, \eta)$ 进行分析。

表2中, 失效概率 $F =$ 累计失效数 / $(n_i + 1)$, $i = 1, 2, 3$ 。

下面对韦布尔分布函数特点进行分析, 对韦布尔分布函数 $1 - F_i(t)$ 两边取两次自然对数有:

$$\ln[-\ln(1 - F_i(t))] = m_i \ln t - B_i \quad (7)$$

式中: $B_i = m_i \ln \eta_i$ 。

从式(7)可以看出, $(\ln t, \ln[-\ln(1 - F_i(t))])$ 数据点呈直线分布。通过线形拟合, 得到不同应力下的截距和斜率的最小二乘估计, 即为 B_i, m_i 的估计值。

表2 器件失效统计

Table 2 Device failure statistics

应力	周期 区间/h	失效数/ 个	累计失 效数/个	失效概率 F/%
$S_1=353\text{ K}$ $n_1=25$	[0,5)	1	1	3.85
	[25,50)	1	2	7.69
	[200,400)	2	4	15.4
	[600,1000)	1	5	19.2
	[1000,1500]	1	6	23.1
$S_2=373\text{ K}$ $n_2=25$	[5,10)	2	2	7.69
	[25,50)	2	4	15.4
	[100,200)	2	6	23.1
	[400,600)	1	7	26.9
	[600,1000)	1	8	30.8
$S_3=393\text{ K}$ $n_3=25$	[1000,1500]	1	9	34.6
	[0,5)	2	2	7.69
	[5,10)	1	3	11.5
	[10,25)	3	6	23.1
	[25,50)	2	8	30.8
	[50,100)	1	9	34.6
	[200,400)	1	10	38.5
	[400,600)	1	11	42.3
	[600,1000)	1	12	46.2
	[1000,1500]	1	13	50

从图3中得到三个应力水平 S_1, S_2, S_3 下载距和斜率的最小二乘估计, $S_1: B_1=3.518, m_1=0.306$; $S_2: B_2=2.987, m_2=0.31$; $S_3: B_3=2.489, m_3=0.325$;

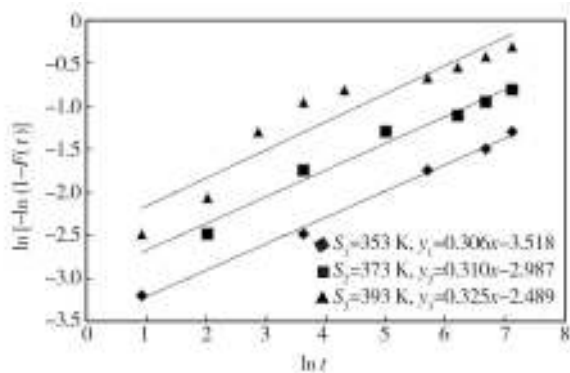


图3 在不同应力下随时间变化器件的韦布尔失效统计

Fig.3 Variation of Weibull failure statistics of the device with time under different stresses

由于 $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ 表明器件失效的机理基本一致。把 B_i 和 m_i 值代入 $B_i = m_i \ln \eta_i$ 可以求得不同应力下寿命评估值为: $\eta_1=98\ 359.65\text{ h}$, $\eta_2=15293.66\text{ h}$, $\eta_3=2118.01\text{ h}$ 。

则总样本的估计值:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^K n_i m_i}{\sum_{i=1}^K n_i} = 0.314$$

由于 $m < 1$ 表明调制器贮存时早期失效较多,在器件可靠性筛选中可以施加一定应力条件对器件进行老化处理,就可以选出大部分寿命短不可靠器件。然后把 $(1/S_i, \ln \eta_i)$ 代入阿伦尼斯加速寿命模型公式(4)可得 $a=-26.1, b=13292$ 。即阿伦尼斯加速寿命模型为:

$$\ln \eta_i = 13\ 292/S_i - 26.1 \quad (8)$$

由式(1)可得阿伦尼斯加速寿命模型中激活能 $E = bK = 1.1\text{ eV}$, 与文献[9—10]相近。

基于阿伦尼斯加速模型,可以计算出不同应力下韦布尔分布的特征寿命,温度为 298, 323, 343, 358, 373, 393 K 对应的特征寿命分别为: 108 705 238.5, 3 442 826.7, 312 472.3, 61 609.1, 13 841.9, 2 257.3 h。

基于韦布尔分布,正常应力水平下(25℃)的贮存可靠度曲线如图4所示。

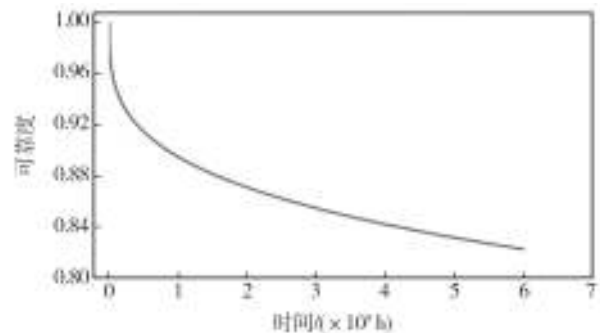


图4 LiNbO₃调制器贮存可靠度曲线(25℃)

Fig.4 Storage reliability curve of LiNbO₃ modulator(25℃)

根据调制器可靠度曲线,在 25℃ 下 LiNbO₃ 调制器贮存 1 年的可靠度为 0.9495,贮存 5 年的可靠度为 0.9177,贮存 10 年的可靠度为 0.8987,贮存 20 年的可靠度为 0.8757。

3 结论

文中结合集成光学调制器的特点,采用基于韦布尔分布的可靠性评估方法,对器件的寿命进行了评估,得出以下结论。

1) 计算出了器件韦布尔分布的形状参数 m 为 0.314,表明调制器贮存时早期失效多,可以对器件可靠性筛选中可以施加一定应力条件对器件进行老化

处理, 就可以选出大部分寿命短不可靠器件。

2) 得到了阿伦尼斯加速寿命模型, 根据该模型可以对不同温度应力下器件的寿命进行计算。

3) 分析得到在 25 °C 环境应力条件下 LiNbO₃ 调制器的可靠度曲线, 并且器件贮存 1 年的可靠度为 0.9454。

4) 计算得到阿伦尼斯加速寿命模型中激活能 E 为 1.1 eV。

航天航空技术正在飞速发展, 随着光电子器件的可靠性以及其性能的不断提高, 越来越多的光电子器件将用于航空航天领域。加速寿命试验已经成为了可靠性试验技术领域一个不可置疑的发展方向。随着研究的进一步深入, 该项技术将有更加广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
WANG Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010.
- [2] 陈世同, 孙枫, 李绪友. 集成光学相位调制器相位漂移补偿方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(1): 45—49.
CHEN Shi-tong, SUN Feng, LI Xu-you. Compensation for phase Drift in an Integrated Optical Phase Modulator[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(1): 45—49.
- [3] 李绪友, 王长伟, 邹继斌. 集成光学器件对光纤陀螺稳定性的影响的研究[J]. 光子学报, 2005, 34(6): 830—834.
LI Xu-you, WANG Chang-wei, ZOU Ji-bin. The Influence of Integrated Optic Device's Stability for Fibre Optic Gyroscopes [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(6): 830—834.
- [4] 马静, 苑丹丹, 晁代宏, 等. 基于漂移布朗运动的光纤陀螺加速贮存寿命评估[J]. 中国惯性技术学报, 2010, (18) 6: 756—760.
MA Jing, YUAN Dan-dan, CHAO Dai-hong, et al. Accelerated Storage Life Evaluation of FOG Based on Drift Brownian Movement[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, (18) 6: 756—760.
- [5] 晁代宏, 马静, 陈淑英. 应用多元性能退化量评估光纤陀螺贮存的可靠性[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 35—40
CHAO Dai-hong, MA Jing, CHEN Shu-ying. Assessment of Storage Reliability for FOGs by Multivariate Degradation Data [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 35—40.
- [6] NAGATA H, LI Y, VOISINE K R, et al. Reliability of Nonhe-metic Bias-free LiNbO₃ Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2457—2459.
- [7] KISSA K M, SUCHOSKI P G, LEWI D K. Accelerated Aging of Annealed Proton-exchanged Waveguide[J]. Journal of Light Wave Technology, 1995, 13(7): 1521—1529.
- [8] 崑诗松, 汤银才, 王玲玲. 可靠性统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
MAO Shi-song, TANG Yin-cai, WANG Ling-ling. Reliability statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [9] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated Life Testing Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [10] 李淦, 郑波. 基于步进应力加速寿命试验的某新型制导弹药储存寿命评估[J]. 火箭与制导学报, 2007, 27(2): 307—308.
LI Gan, ZHENG Bo. Assessment of the Storage Life of a New Guided Munitions Based on the Accelerated Life Test of the Stepping Stress Accelerated Life Test[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2): 307—308.
- [11] 牛跃听, 穆希辉. 信息化弹药储存寿命评估研究展望[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 94—97.
NIU Yue-ting, MU Xi-hui. Estimation of Ammunition Storage Life of Information Research Prospects[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 94—97.
- [12] 袁宏杰, 李楼德, 段刚, 等. 加速度计贮存寿命与可靠性的步进应力加速退化试验评估方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 113—116.
YUAN Hong-jie, LI Lou-de, DUAN Gang, et al. Storage Life and Reliability Evaluation of Accelerometer by Step Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(1): 113—116.
- [13] 周堃, 罗天元. 火箭储存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 6—11.
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan. Missiles and Storage Life Prediction Technology were Reviewed[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2): 6—11.
- [14] NAGATA H, KIUCHI K. Temperature Dependence of Drift of Ti: LiNbO₃ Optical Modulators with Sputter Deposited SiO₂ Buffer Layer[J]. JApplPhys, 1993, (73): 4162—4164.
- [15] KOROTKY S K, VESELKA J. An RC Network Analysis of Long Term Ti: LiNbO₃ Bias Stability[J]. J Lightwave Technol, 1996(14), 2687—2697.