摘要：随着氧化锆氧传感器在航空、航天、船舶等领域广泛应用，传感器的寿命及可靠性是应用过程中的一个重要问题。为了评估传感器的寿命及可靠性，本文从传感器的实际使用情况出发，研究制定其寿命试验方案，并按照试验方案进行了寿命试验。寿命试验结果表明，9只试验样品连续通电15个月后，编号为16#和19#两只样品失效，失效时间分别为1668h和9060h，其余7只样品性能正常。分别采用截尾数据处理方法和退化试验处理方法对试验数据进行了统计和分析，评估传感器可靠性，得到正常应力水平下可靠度为0.5、0.99和0.999的传感器可靠寿命估计值及平均寿命估计值。

关键词：氧化锆氧传感器；寿命试验；可靠性评估
中图分类号：TP212　　文献标识码：A　　文章编号：1006-883X(2020)07-0013-06
收稿日期：2020-06-18

氧化锆氧传感器寿命试验及可靠性评估

张巍　刘智敏　王洋洋　杨丹
中国电子科技集团公司第四十九研究所，黑龙江哈尔滨 150001

一、引言

氧化锆氧传感器广泛应用于航空、航天、船舶等军事工程和装备领域中[1-3]，在使用过程中扮演着不可替换的角色，其稳定性及可靠性直接影响上级系统运行。随着传感器使用领域的增加，系统对传感器的寿命及可靠性也提出了更高的要求，因此有必要对其可靠性水平和寿命进行全面评估。为了对氧化锆氧传感器的可靠性与寿命进行评估，本文依据传感器常用的实际使用情况，进行寿命试验。基于氧化锆氧传感器长期寿命试验的数据基础上对其进行可靠性和寿命分析和评价，达到评估传感器可靠性的目的，并将本方法推广到多种不同类型的同类传感器中，具有重要的工程应用价值。

二、传感器寿命试验

1、试验条件

传感器寿命试验条件为一般试验室环境条件：温度：15℃～35℃；湿度：20% RH～70% RH；压力：实验室气压。

2、试验样品

从老化筛选合格的20只传感器中随机抽取9只传感器进行寿命试验，产品编号为3#、9#、10#、13#、14#、16#、17#、18#、19#。

3、试验方法

寿命试验产品采用+12VDC供电，传感器工作过程中，试验装置或试验环境内应能够实现空气流动，无空气流动的环境可采用12V/0.15A的风扇进行通风。寿命试验开始前，试验样品进行一次精度测试。寿命试验中，试验样品每隔3个月进行一次精度测试。

寿命试验流程：

（1）将试验产品连接电源和测量仪器，连续加电，累计工作时间；

（2）对试验产品进行空气（20.9%）浓度点测试，每天记录试验样品输出电压（V），并由公式（1）计算出传感器的实测浓度，记为C_0：

$$C_y=100-ae^{-bX} \quad (1)$$

式中，X—传感器输出电压，V；

a、b—同一只传感器对应指数曲线的拟合常数；

C_y —传感器拟合方程输出浓度，%（体积百分比）。

由公式（2）可得，在不同浓度下传感器输出的最大偏差，即漂移量：

$$\delta=(C_i-C_{0i})_{max} \quad (2)$$

式中，δ —传感器输出偏差，%（体积百分比）；

C_i —各点 O_2 标准浓度，%（体积百分比）；

C_{0i} —传感器各点实测浓度，%（体积百分比）。

（3）定期对试验样品进行精度测试。

4、失效判据

（1）漂移量达到超出 ±1% 范围内；

（2）传感器输出超过 5.6V，即达到限幅状态；

（3）传感器出现机械损伤、破裂；

（4）在氧浓度 10% ～ 50% 范围内，精度超出 ±1% 范围。

三、结果与分析

按照上述的试验方法进行氧化锆氧气传感器寿命试验，寿命试验产品连续通电 15 个月，试验期间共测试精度 6 次，精度测试结果如表 1 所示。寿命试验产品输出随时间变化如图 1 所示，漂移量随时间变化如图 2 所示。

由表 1 可知，在过去 15 个月寿命试验中，6 次测试产品精度，9 只寿命试验产品精度均在 ±1% 范围内。

由图 1 及图 2 可知，9 只寿命试验产品中有 2 只样品漂移量超出 ±1% 范围内，判定传感器失效。失效产品编号为 16# 和 19#，2 只产品的失效时间分别为 1668h 和 9060h。

四、寿命试验数据处理及评估

1、寿命试验数据处理及评估流程

由图 1 可知，寿命试验失效的样品数据表现为随时间有下降趋势，即表现为退化趋势，因此可用退化数据处理方法进行处理，同时由

表 1 寿命试验产品精度测试结果

样品编号	0 个月	3 个月	6 个月	9 个月	12 个月	15 个月
3#	-0.347%	0.155%	0.507%	-0.135%	-0.336%	0.116%
9#	0.179%	-0.178%	0.067%	0.117%	0.067%	-0.243%
10#	0.134%	-0.131%	-0.309%	0.292%	-0.296%	0.067%
13#	0.368%	0.180%	0.208%	0.187%	-0.245%	-0.239%
14#	0.247%	-0.251%	0.318%	-0.349%	0.139%	0.066%
16#	-0.238%	0.182%	-0.396%	0.274%	-0.121%	0.221%
17#	0.178%	0.116%	0.066%	0.136%	0.167%	-0.206%
18#	0.201%	0.367%	-0.415%	0.136%	-0.115%	0.118%
19#	-0.242%	0.180%	0.067%	-0.167%	0.179%	-0.321%

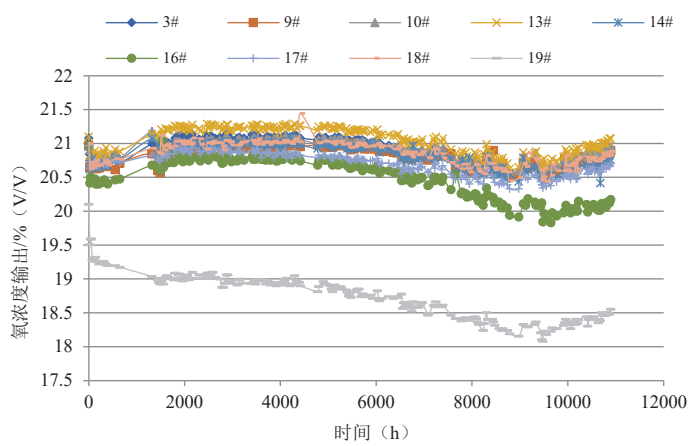

图 1 寿命试验产品输出随时间变化图

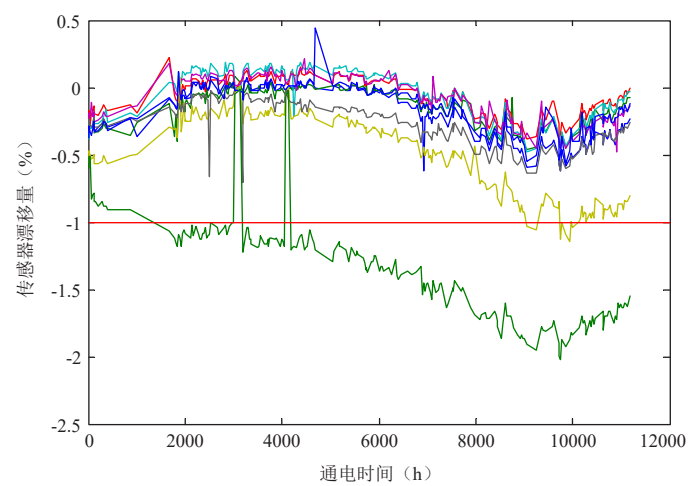

图 2 寿命试验产品输出漂移量变化图

（图中红线位置为漂移量 -1%）

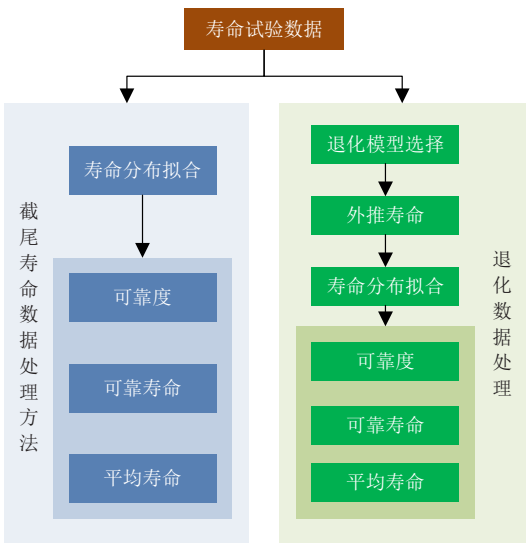

图 3 寿命试验数据处理流程

表 2 分布参数极大似然估计（MLE）估计结果

分布	参数估计结果	
指数分布	λ=2.2447e^{-5}	
对数正态分布	logμ=4562.3272	logσ=3711.6234
威布尔分布	β=0.9994	η=44587.8559

于寿命试验进行实践较长，失效样本较少，也可选用截尾寿命数据处理方法进行处理。因此，根据寿命试验数据特点，采用截尾寿命数据处理方法和退化数据处理方法分别进行处理，流程如图 3 所示。

2、截尾数据处理方法

将寿命试验数据采用截尾数据处理方法进行分析处理。截尾数据处理方法中，首先分析数据的失效情况，9 只产品中有 2 只失效，其余未失效，失效时间分别为 1668h 和 9060h，选择截尾时间为 11196h；然后基于上述信息，分别使用指数分布、对数正态分布和威布尔分布对寿命分布进行拟合，拟合公式如公式（3）、（4）、（5）所示，使用极大似然估计（MLE）对各个分布的参数进行估计，得到三种方法的参数估计结果如表 2 所示。

传感器的寿命 T 服从指数分布，其分布函数为：

$$F(t)=1-e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中，$F(t)$ —寿命分布函数；

λ —失效率；

t —时间。

传感器的寿命 T 服从对数正态分布，其分布函数为：

$$F(t)=\Phi\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right) \quad (4)$$

式中，$F(t)$ —寿命分布函数；

μ —对数均差；

σ —对数方差；

Φ —分布系数。

传感器的寿命 T 服从威布尔分布，其分布函数为：

$$F(t)=1-e^{-(t/\eta)^{\beta}} \quad (5)$$

式中，$F(t)$ —寿命分布函数；

t —时间；

η —特征寿命；

β —形状参数。

表 3 指数分布、对数正态分布、威布尔分布三种模型比较结果

分布	拟合优度平均值 AVGOF	相关系数平均值 AVPLOT	似然检验值 LKV	分布最终排名 Rank
指数分布	1.32e-^{07}	5.6282	-23.4087	2
对数正态分布	9.99e-^{09}	5.6750	-37.1282	3
威布尔分布	1.35e^{-07}	5.6254	-23.4087	1

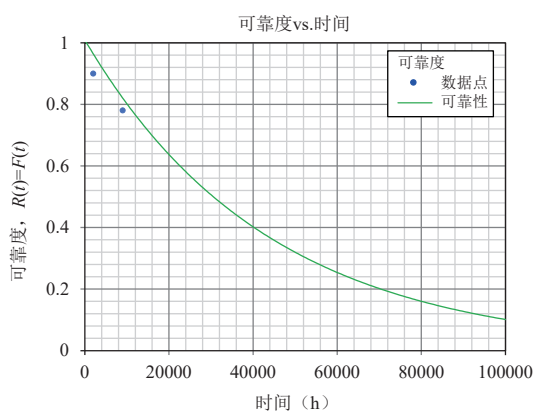

图 4 寿命试验产品的可靠度与时间关系（威布尔分布）

表 4 可靠寿命及平均寿命

可靠度	可靠寿命估计值（h）
0.5	30899
0.99	4446
0.999	4400
平均寿命	44598

表 5 退化拟合结果

模型	线性函数	指数函数	幂函数	对数	Gompertz	Lloyd-Lipow
模型残差平方和 SSE	44.2	44.8	74.9	73.3	3099.3	87.7

表 6 退化模型拟合参数

退化模型参数 - 线性（$y=a*x+b$）					
编号	参数 a	参数 c	编号	参数 a	参数 c
10#	-1.90E-05	5.0628	18#	-2.50E-05	5.017679
13#	-2.80E-05	5.122819	19#	-9.70E-05	4.227996
14#	-3.30E-05	5.123624	3#	-3.80E-05	5.043069
16#	-7.30E-05	4.952673	9#	-1.50E-05	4.948196
17#	-3.50E-05	4.941316	-	-	-

为了选取合适的寿命分布模型，对三种寿命分布模型的拟合结果进行量化。量化指标包括：拟合优度值平均值（AVGOF），它反应了期望值与获得结果之间的统计不同性；相关系数平均值（AVPLOT），度量通过极大似然方法估计出的参数所得到的拟合结果与实际点之间的差异 [4-5]；似然函数值（LKV），基于分布参数计算得到对数似然函数的值 [6-10]。通过给上述三个指标分配权重为 0.4、0.1 和 0.5 计算最终值，最终值最小最优。三种模型量化结果如表 3 所示。

由表 3 可知，威布尔分布作为寿命分布最为合适，选用威布尔分布进行分布拟合，得到寿命试验产品的可靠度和时间关系如图 4 所示。

基于威布尔分布的可靠寿命和平均寿命计算方法，产品可靠度为 0.5、0.99、0.999 的可靠寿命和平均寿命估计值如表 4 所示。

3、退化数据处理方法

将寿命试验数据采用退化数据处理方法进行分析处理。采用退化数据处理方法中，为了避免数据中同时出现正值和负值，将所有数据向上抬升 5，将该失效阈值设置为 4，然后对数据基于退化数据处理方法进行分析。选用线性函数、指数函数、幂指数、对数、Gompertz、Lloyd-Lipow 六种模型对数据进行分析处理，得到各模型的残差平方和 SSE 如表 5 所示。

选择拟合后残差平方和 SSE 最小的模型作为退化数据的退化模型。根据表 4 计算结果，线性函数的 SSE 最小，将其作为退化模型。寿命试验中各传感器的退化模型拟合参数如表 6 所示。

根据退化模型拟合参数，对寿命试验中各传感器进行寿命退化预测，预测结果如图 5 所示。各产品的寿命预测如表 7 所示。

将指数分布、对数正态分布及威布尔分布进行比较，选择最适合的寿命分布。使用 MLE 对各个分布的参数进行估计，结果如表 8 所示。

为了选取合适的寿命分布，对三种分布的拟合结果进行量化，

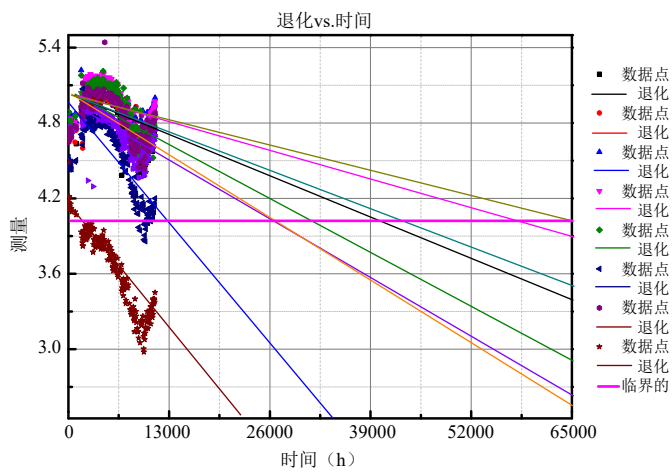

图 5 寿命试验产品的退化预测

表 7 产品的寿命预测

编号	10#	13#	14#	16#	17#	18#	19#	3#	9#
寿命预测 (h)	54702	39562	34188	9060	26986	40066	1668	27583	64397

表 8 分布参数极大似然估计（MLE）估计结果

分布	参数估计结果	
指数分布	$\lambda=3.29e^{-5}$	
对数正态分布	$\log\mu=10.06$	$\log\sigma=1.09$
威布尔分布	$\beta=1.04$	$\eta=38618.01$

方法与前述方法相同，结果如表 9 所示。

通过以上分析结果显示，威布尔分布作为寿命分布拟合最为合适。因此可以得到这一批次产品的可靠度随时间变化情况，如图 6 所示。

基于威布尔分布的可靠寿命和平均寿命计算方法，产品可靠度为 0.5、0.99、0.999 的可靠寿命和平均寿命估计值如表 10 所示。

表 9 指数分布、对数正态分布、威布尔分布三种模型比较结果

分布	拟合优度平均值 AVGOF	相关系数平均值 AVPLOT	似然检验值 LKV	分布最终排名 Rank
指数分布	67.5	10.9	-102.7	3
对数正态分布	51.4	9.9	-103.9	2
威布尔分布	23.5	8.1	-102.6	1

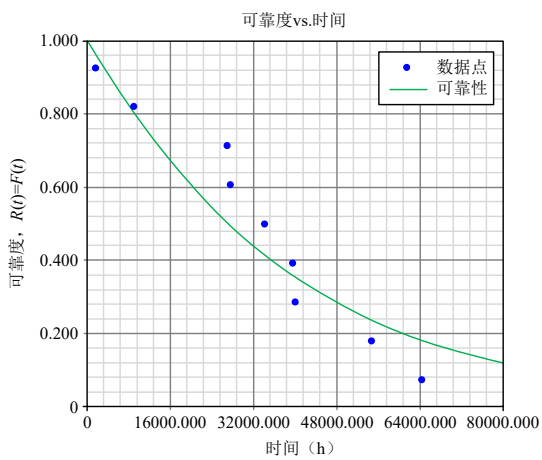

图 6 可靠度—时间关系

表 10 可靠寿命及平均寿命

可靠度	可靠寿命估计值（h）
0.5	27171
0.99	4680
0.999	3051
平均寿命	37978

五、结论

本文根据氧化锆氧传感器的实际使用情况，抽取 9 只样品进行了 15 个月的寿命试验。寿命试验结果表明，编号为 16# 和 19# 两只产品失效，失效时间分别为 1668h 和 9060h。对氧化锆氧传感器的寿命试验数据采用了截尾数据处理方法和退化试验处理方法对试验数据进行了统计处理，对传感器的可靠性进行了评估，并给出了正常应力水平下可靠度为 0.5、0.99 和 0.999 的传感器可靠寿命估计值及平均寿命估计值。两种方法试验数据结果存在一定差异，这是由于任何一种处理方法均是建立在大样本基础上，本文中寿命试验的试验样本量较小，导致结果有一些偏差。

参考文献

[1] 徐雅琦 . 致密扩散障极限电流氧传感器热应力分析及 YSZ 力学性能的研究 [D]. 南昌 : 华东交通大学 , 2014.

[2] 简家文 . 钇稳定 ZrO_2 固体电解质氧传感器的研究 [D]. 成都 : 电子科技大学 , 2004.

[3] 李重 , 向蓝翔 , 谢姣容 , 等 . 钇稳定氧化锆铂电极活化时间对氧化锆氧传感器性能的影响 [J]. 材料保护 , 2014, 47(10):39-41.

[4] 贺国芳 . 可靠性数据处理与寿命评估 (可靠性工程教材之五)[M]. 河南 : 科普与教育工作出版社 , 1984.

[5] 赵宇 . 可靠性数据分析 [M]. 北京 : 国防工业出版社 , 2011.

[6] 冯静 . 小子样复杂系统可靠性信息融合方法与应用研究 [D]. 长沙 : 国防科技大学 , 2004.

[7] Garzon F, Raistrick I, Brosha E. Dense diffusion barrier limiting current oxygen sensors [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1998, 50(2): 125-130.

[8]Pascual F. G., Meeker W.Q., Escobar L.A. Accelerated life test models and data analysis [M]. Springer Handbook Of Engineering Statistic, 2006.

[9]Tang L.C., Xu K. A multiple objective framework for planning accelerated life tests [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005,54(1): 58-63.

[10]Elsayed E. A., Zhang, H. Design of PH–based accelerated life testing plans under multiple–stress–type. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(3): 286-292.

Life Test and Reliability Assessment of Zirconia Oxygen Sensor

ZHANG Wei, LIU Zhi-min, WANG Yang-yang, YANG Dan

(*The* 49th *Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: With the wide application of zirconia oxygen sensor in aviation, aerospace, ship and other fields, the life and reliability of the sensor is an important issue in the application process. In order to evaluate the life and reliability of the sensor, this paper studies and formulates the life test scheme of the sensor based on the actual use of the sensor, and carries out the life test. The results of life test showed that two samples (No.16 and No.19) failed after 15 months of continuous power supply, and the failure time was 1668h and 9060h respectively, and the performance of the remaining seven samples was normal. The censored data processing method and degradation test processing method were used to analyze the test data, and the reliability of the sensor was evaluated. The estimated values of reliable life and average life of sensors with reliability of 0.5, 0.99 and 0.999 under normal stress level were obtained.

Key words: zirconia oxygen sensor; life Testing; reliability

作者简介

张巍：中国电子科技集团公司第四十九研究所，高级工程师，长期从事传感器研究。

通信地址：哈尔滨市松北区龙盛路 969 号

邮编：150060

邮箱：zw7510@139.com

刘智敏：中国电子科技集团公司第四十九研究所，高级工程师，主要从事氧传感器研究。

王洋洋：中国电子科技集团公司第四十九研究所，工程师，主要从事化学量传感器研究。

杨丹：中国电子科技集团公司第四十九研究所，工程师，主要从事温度传感器研究。