Probability Distribution and Reliability Analysis of Metal Film Resistance before and after Failure*

*WANG Qiannan, HE Wenhui**

(*Mechanical and Electrical Engineering College, China University of Metrology, Hangzhou Zhejiang* 310018, *China*)

Abstract: There are always uncontrollable factors affecting the stability of product quality in the process of products. To solve this problem, this paper presents a method to improve the quality of resistance from the point of view of reliability distribution function. In this paper, the probability distribution function of resistance value before and after failure and the probability distribution function under normal stress and the reliability index are obtained by means of stepping stress accelerated life test and probability distribution test of resistance before and after failure. The experimental results show that the distribution of resistance value before and after failure belongs to Weibull distribution. At the same time, the distribution function is given when the resistance damage is 7.2%~15.6% and the failure model is an irreversible accumulated damage model under continuous voltage application, the obvious difference between qualified resistance and smoke damage resistance probability distribution curve is obtained, it is thus possible to define the mass properties of resistors in terms of probability distributions.

Key words: metal film resistance; probability distribution function; reliability

EEACC: 2120; 7310J **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.003

金属膜电阻失效前后概率分布及可靠性分析*

王倩男, 何文辉*

(中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 产品在加工时总会有不可控的因素影响产品质量的稳定性, 为解决这一问题, 本文从可靠性分布函数的角度提出了提高电阻质量的方法。本文通过对金属膜电阻进行步进应力加速寿命试验以及电阻失效前后概率分布试验, 得到了失效前后的阻值概率分布函数及正常应力下的概率分布函数与可靠性指标。实验结果表明, 电阻阻值失效前后分布都属于威布尔分布。同时, 给出了电阻损伤 7.2%~15.6%, 且失效模型为持续施加电压下不可逆的积累损伤模型时的分布函数, 并获得了合格电阻与冒烟损坏电阻概率分布曲线的明显区别, 从而, 有可能从概率分布角度定义电阻的质量特性。

关键词: 金属膜电阻; 概率分布函数; 可靠性

中图分类号: TN306; TN60 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2021)01-0014-05

金属膜电阻是膜式电阻器(Film Resistors)中的一种, 是采用高温真空镀膜技术将镍铬或类似的合金紧密附在瓷棒表面形成皮膜, 经过切割调试阻值, 以达到最终要求的精密阻值, 然后加适当接头切割, 并在其表面涂上环氧树脂密封保护而成。工厂在生产电阻时, 因为工艺条件, 设备条件, 原材料的波动, 导致达不到预期的可靠性指标[1]。要提高电阻的可靠性, 需要知道电阻失效的原因, 对失效模型进行量化判定, 进而促进产品质量的提升, 此外, 金属膜电阻可靠性指标的量化分析, 对批量生产时控制产品质量的稳定性、一致性均有重要意义。鉴于金属膜电阻可靠性较高的特点, 本文探讨了步进应力加速寿命试验在金属膜电阻可靠性指标分析, 及电阻失效原因查找方面的方法与理论模型构建。

近年来, 一些学者对此做了相关研究。张放等[2]采用不同程度的高温高湿试验对片式厚膜电阻器长期可靠性及失效模式进行了研究分析, 并提出正确涂覆三防漆能够有效提高电阻在高温高湿下

项目来源: 浙江省公益技术研究计划项目(LGF20F020011)
收稿日期: 2020-06-16 **修改日期**: 2020-08-01

的可靠性水平。曹玉保等[3]对金属氧化膜电阻进行了失效分析,成功准确地找到了金属膜电阻的失效部位,并从电气角度分析了金属膜电阻的失效过程,总结了提高金属膜电阻的可靠性的方法。David Han[4]在连续检查和间隔检查两种不同的故障检查模式下,使用基于条件块独立性的随机终止时间的递归关系,得出了在渐进式 I 型检查下一般 k 级逐步应力加速寿命试验的预期终止时间。谭勇等[5]建立了步进加速寿命试验数据处理方法步骤,针对步进应力加速寿命试验的设计提出了建议。陈愿等[6]使用定时截尾恒定应力加速寿命试验方法来评估电子元器件在一定可靠度下的贮存寿命,建立威布尔分布加速寿命模型,采用极大似然法进行参数估计,得到模型未知参数的极大似然估计结果,最后外推得到正常温度下的贮存寿命。强苗[7]对电子元器件的失效模型与可靠性试验方法进行了探讨。柏小娟[8]在已有的筛选标准的前提下,对电子元器件制定了两类通用筛选流程,设计了典型型号筛选方案,并研究了国产器件的补充筛选。Nga Man Jennifa Li 等[9]对电子元件保质期的评估方法和失效原理进行了研究,根据失效机理及其类别,选择失效模型的物理性质和可接受标准来评估保质期,提出了一种基失效机理(POF)的大多数电子元器件的寿命评估方法。Romit Kulkarni 等[10]研究了在循环热载荷作用下,表面贴装在印刷电路板(PCBs)上、热固性注塑封装的典型电子元件的可靠性,并对电子元件的特征寿命进行了统计计算。

综上,可以发现现有的研究大多集中在电子元器件的筛选,可靠性分析,失效模型以及寿命的估计,但是对电子元器件失效前后的阻值概率分布情况,以及哪种失效模型会造成这种概率分布少有研究,本文从电阻失效前后的阻值概率分布试验及步进应力加速寿命试验两部分来展开分析讨论,企图从失效概率分布的角度给出电阻质量特性。

1　实验过程

1.1　实验样品选取

RJ14 金属膜电阻具有轴向引线、涂漆绝缘、色环标志,具有体积小、精度高、温度系数小、耐湿性好、耐热性好、阻值稳定可靠等特点,适用于各种交、直流电路,本文将其作为实验研究对象。本次试验所用设备包括:示波器一台,万用表一个。示波器可调最高电压为 31 V,而本次试验采用步进应力加速寿命试验,每伏电压加压时间为 20 s,需要小功率,小阻值的电阻才能保证在 31 V 前会冒烟损坏,所以选取了精度为 0.1%,阻值 25 Ω 的 RJ14 金属膜电阻,并从 50 个电阻中随机选取了 20 个进行试验,电阻的帽盖结构图如图 1 所示,主要参数表如表 1 所示。

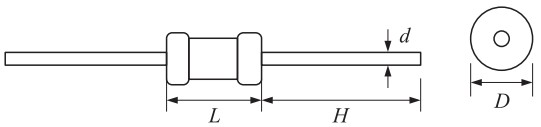


图 1　RJ14 电阻帽盖结构图

表 1　RJ14 电阻主要参数表

型号	品种	额定功率/W	阻值范围/Ω	允许偏差/%	温度系数/(×10⁻⁶/℃)	最高工作电压/V	外形尺寸/mm			
							L	*D*	*d*	*H*
RJ14	EL	0.25	24.8~25.3	±2	±100	250	7.0	2.5	0.6	27

1.2　电阻失效前后的概率分布试验

首先,取 20 个电阻,分别测量 20 个电阻的阻值,并分别对电阻步进加压,步进电压为 1 V,每伏保压时间为 20 s,记录电阻冒烟损坏时的电压与阻值。图 2 为冒烟损坏的电阻。

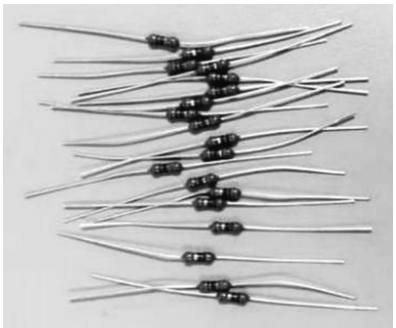


图 2　电阻冒烟损坏

合格电阻阻值为 24.8 Ω、25 Ω、25 Ω、25 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.1 Ω、25.2 Ω、25.2 Ω、25.2 Ω、25.2 Ω、25.2 Ω、25.2 Ω、25.2 Ω、25.3 Ω。

冒烟损坏电阻阻值为 21.1 Ω、21.3 Ω、21.3 Ω、21.4 Ω、21.7 Ω、21.8 Ω、21.9 Ω、22.0 Ω、22.1 Ω、22.3 Ω、22.4 Ω、22.4 Ω、22.5 Ω、22.6 Ω、22.6 Ω、22.9 Ω、23.0 Ω、23.0 Ω、23.0 Ω、23.2 Ω。

其中 9 V 时失效 3 个,10 V 时失效 17 个。收集到数据后,对数据进行分析,画出其频率直方图以及累积频率直方图,由频率直方图可判断大致属于威布尔分布,然后对其进行假设验证。分布检验采用的是 *F* 检验,经过检验后假设成立,并利用最小二乘法对参数进行估计。

两参数威布尔分布的分布函数为：

$$F(t)=1-e^{-t^m/t_0},m>0,t_0>0,t\geqslant 0 \quad (1)$$

因此

$$1/[1-F(t)]=e^{t^m/t_0} \quad (2)$$

两边取两次对数，可得

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right)=m\ln t-\ln t_0 \quad (3)$$

令

$$y=\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right),x=\ln t,b_0=-\ln t_0 \quad (4)$$

于是得到回归方程

$$y=b_0+b_1x \quad (5)$$

根据观测数据$\left\{\ln t_i,\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t_i)}\right);i=1,2,\cdots,n\right\}$，用最小二乘法得到回归系数 b_0,b_1，其中 $F(t_i)$ 的值可以采用经验分布计算，由此得到参数估计为 $\hat{m}=b_1$，$\hat{t}_0=e^{-b_0}$。由此可以得到合格电阻的阻值概率分布函数与冒烟损坏电阻的阻值概率分布函数。

1.3 步进应力加速寿命试验

试验中采用的电阻为 RJ14 金属膜电阻，额定电压为 2.5 V，施加的应力 S_1、S_2、……、S_8 分别为 3 V、4 V、……、10 V，每 V 电压保压时间为 20 s，在 9 V 时冒烟损坏 3 个，10 V 时 17 个，记录失效时间，推出失效时间的概率分布函数 $F(t)=1-e^{(t/146.6)^{45.54}}$，属于威布尔分布。

对威布尔分布下的步进应力加速寿命试验数据进行统计分析，首先进行数据折算处理，将步进加速试验数据得到的 r 个数据全部折算到应力水平 S_1 下，得到

$$t_1(b)=\sum_{i=1}^{6}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(7)}t_{7_1} \quad (6)$$

$$t_2(b)=\sum_{i=1}^{6}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(7)}t_{7_2} \quad (7)$$

$$t_3(b)=\sum_{i=1}^{6}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(7)}t_{7_3} \quad (8)$$

$$t_4(b)=\sum_{i=1}^{7}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(8)}t_{8_1} \quad (9)$$

$$t_5(b)=\sum_{i=1}^{7}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(8)}t_{8_2} \quad (10)$$

$$t_6(b)=\sum_{i=1}^{7}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(8)}t_{8_3} \quad (11)$$

$$\vdots$$

$$t_{20}(b)=\sum_{i=1}^{7}e^{bH(i)}\tau_i+e^{bH(8)}t_{8_{17}} \quad (12)$$

式中：τ_i 是在应力水平 S_i 下的工作时间，m 为形状参数，η_i 为特征寿命，$t_1\sim t_{20}$ 为应力 S_1 下的失效时间（单位：s），t_{7_1} 为应力 S_7 下第一个电阻损坏的时间，$t_{7_1}\sim t_{8_{17}}$ 以此类推。本文选用逆幂律加速模型 $\ln\eta_i=a+b\varphi(S_i)$，$a,b$ 为待估参数，为方便起见，记 φ_i 为 $\varphi(S_i)$，即 $\varphi_i=\ln(S_i)$；$H(i)=\varphi_1-\varphi_i$，这批数据中含有未知数 b，将这批数据记为 $t_1(b)<t_2(b)<\cdots<t_{20}(b)$。

由逆矩估计法得

$$\sum_{i=1}^{r-1}\ln\frac{u_r(m,b)}{u_i(m,b)}=r-1 \quad (13)$$

式中：$r=20$，$u_i(m,b)=\sum_{j=1}^{i}t_j^m(b)+(n-i)t_i^m(b)$，$i=1,2,\cdots r$，$n=20$，$m$ 为形状参数，此式中含有未知数 m 和 b，为此再利用准样本 $t_1(b)<t_2(b)<\cdots<t_{20}(b)$，求出 m^{-1} 得最佳线性无偏估计（Best Linear Unbiased Estimation，BLUE），即

$$\hat{m}^{-1}=\sum_{i=1}^{r}C(n,r,i)\ln t_i(b) \quad (14)$$

式中：$C(n,r,i)=[-0.035\ 2,-0.037\ 7,-0.038\ 9,-0.039\ 4,-0.039\ 2,-0.038\ 4,-0.037\ 1,-0.035\ 2,-0.032\ 7,-0.025\ 9,-0.025\ 4,-0.020\ 5,-0.014\ 3,-0.006\ 7,0.003\ 0,0.015\ 4,0.032\ 1,0.056\ 0,0.095\ 1,0.228\ 8]$，$r=20$。

将 m^{-1} 的估计代入式（13）中，可得到只含一个未知参数 b 的方程，接着通过数值方法计算 b 的估计值 $\hat{b}$，再代入式（14）中求得 $\hat{m}$，然后可得应力水平 S_1 下特征寿命 η_1 的估计值 $\hat{\eta}_1$：

$$\hat{\eta}_1=\left\{\frac{1}{r}\left[\sum_{i=1}^{r}\hat{t}^{\hat{m}}_i(\hat{b})+(n-r)\hat{t}^{\hat{m}}_i(\hat{b})\right]\right\}^{1/m} \quad (15)$$

式中：$\hat{m}$ 和 $\hat{b}$ 为 m 和 b 的估计值。

由此得到加速方程中的参数 a 估计值 $\hat{a}$：

$$\hat{a}=\ln\hat{\eta}_1-\hat{b}\varphi_1 \quad (16)$$

最后得到正常应力水平 S_0 下特征寿命 η_0 估计值 $\hat{\eta}_0$：

$$\hat{\eta}_0=e^{\hat{a}+\hat{b}\varphi_0} \quad (17)$$

式中：φ_0 是 $\ln(S_0)$，$\hat{a}$、$\hat{b}$ 为 a、b 的估计值。

2 实验结果和讨论

2.1 电阻失效前后的概率分布试验结果

在电阻失效前后的概率分布试验中，电阻的失效原因是持续的加压使电阻受到应力损伤，属于积累损伤模型，且应力撤走后电阻仍然失效，在这种失效模型下阻值概率分布函数为 $F(t)=1-e^{(t/22.52)^{41.32}}$，合格电阻的阻值概率分布函数为 $F(t)=1-e^{(t/25.16)^{293.3}}$。图 3 为冒烟损坏电阻的阻值概率分布图，图 4 为合格电阻的阻值概率分布图。

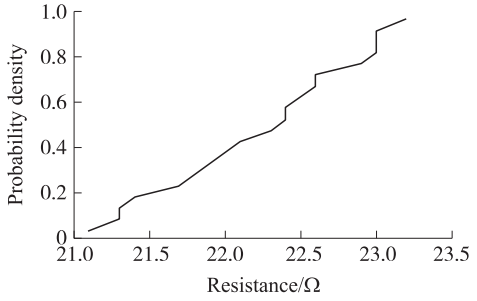


图 3　冒烟损坏电阻的阻值概率分布图

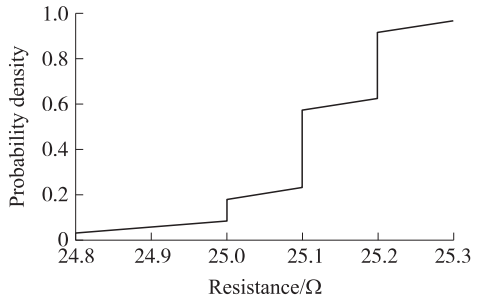


图 4　合格电阻的阻值概率分布图

2.2　步进应力加速寿命试验结果

在步进应力加速寿命试验中,由式(13)~式(17)得到$\hat{b}=-587.37$,$\hat{m}=0$,$\hat{\eta}_1=1$,$\hat{a}=587$,$\hat{\eta}_0=e^{49}$,最后得出正常应力下的电阻概率分布函数 $F(t)=1-e^{-(t/e^{49})}$,可靠度函数 $R(t)=e^{-(t/e^{49})}$,失效率 $\lambda(t)=1/e^{49}$,可靠寿命 $t_r=(1/\lambda)\ln(1/R)$,中位寿命 $t_{0.5}=e^{49}\ln 2$,特征寿命 $t_{e^{-1}}=e^{49}$。由这些数据可以发现这批电阻失效率较低,寿命较长,可靠性比较高。

2.3　讨论

要提高电阻的可靠性,首先需要知道电阻可能的失效原因(发生率),会导致的失效效应(严重度),以及现行管制方式所能检测出此失效模式的能力(难检度),任何改进措施都是为了降低其发生率,严重度和难检度,增加设计确认/检验只能降低难检度,若要降低发生率,只能通过设计更改消除或降低失效模式发生原因,降低严重度。针对积累损伤模型采取相应的处理方法,不断试验发现故障,并消除故障,不断扩大破坏裕度和工作裕度,可以有效加强耐环境能力,提高产品可靠性。

根据上述对金属膜电阻的研究,由于二极管与电容被击穿时阻值也会发生变化,或许可将本文对金属膜电阻的试验方法扩展到二极管与电容的研究中,对二极管与电容进行电阻失效前后的概率分布试验以及步进应力加速寿命试验,得到失效前后的阻值概率分布图、概率分布函数以及正常应力下的概率分布函数与可靠性指标,从失效概率分布的角度给出二极管与电容质量特性。

下一步,可以研究二极管与电容失效前后是否属于同一分布,若属于不同分布,找出这种差异的原因;然后对比金属膜电阻、二极管、电容三者失效后的概率分布是否属于同一分布,若属于不同分布,同样找出差异原因。

3　结论

(1)由实验样品失效前后阻值对比,可发现当电阻损伤 7.2%~15.6%,且失效模型为持续施加电压下不可逆的积累损伤模型时,分布函数为 $F(t)=1-e^{(t/22.52)^{41.32}}$;

(2)通过分布函数,从统计上可以定量区别出合格电阻,冒烟电阻损坏两种情况,合格电阻的概率分布函数呈阶梯状,梯度较大,冒烟损坏电阻概率分布函数是一条比较平滑的曲线;

(3)通过寿命加速试验可以得到正常应力下电阻的可靠性指标,可靠度函数 $R(t)=e^{-(t/e^{49})}$,失效率 $\lambda(t)=1/e^{49}$,可靠寿命 $t_r=(1/\lambda)\ln(1/R)$,中位寿命 $t_{0.5}=e^{49}\ln 2$,特征寿命 $t_{e^{-1}}=e^{49}$,缩短了试验时间;

(4)当给予二极管一定的反向电压时,可使二极管击穿,而给予电容一定的正向电压后,电容也会被击穿,二者阻值都会发生相应的变化。所以本文对电阻的分析方法和结论(概率分布函数会发生显著变化)或许可以扩展到二极管,电容等其他电子元器件中指导生产。

参考文献:

[1] 韩璞辉. 电子元器件的可靠性筛选及相关问题解析[J]. 科技创新与应用,2016(23):154.

[2] 张放,王波,丁亭鑫. 片式厚膜电阻器长期可靠性及失效模式研究[J]. 电子工艺技术,2020,41(2):118-121.

[3] 曹玉保,周兆庆,吴凯. 金属氧化膜电阻的失效分析方法研究[J]. 中国集成电路,2017,26(11):69-72.

[4] David Han. Expected Termination Times of Progressively Type-I Censored Step-Stress Accelerated Life Tests under Continuous and Interval Inspections[J]. Statistica Neerlandica,2020,74(2):112-124.

[5] 谭勇,周堃,罗天元,等. 步进应力加速寿命试验数据处理方法在产品定寿试验中的应用[J]. 装备环境工程,2017,14(1):30-33.

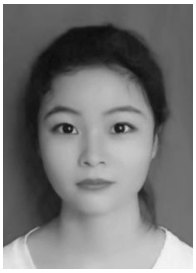
[6] 陈愿. 基于威布尔分布的某电子部件贮存可靠性寿命评估[J]. 电子元器件与信息技术,2019(1):1-4,14.

[7] 强苗. 探究电子元器件的失效模型与可靠性试验方法[J]. 电子世界,2019(16):76-77.

[8] 柏小娟. 电子元器件可靠性筛选方案设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.

[9] Nga Man Jennifa Li, Diganta Das, Patrick McCluskey. Review of Shelf Life Evaluation Methods and a Physics of Failure Approach for Shelf Life Estimation for Electronic Components[J]. Microelectronics Reliability,2019,99:152-160.

[10] Romit Kulkarni, Mahdi Soltani, Peter Wappler, et al. Reliability Study of Electronic Components on Board-Level Packages Encapsulated by Thermoset Injection Molding[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2020, 4(1): 26-39.



王倩男(1998—),女,硕士研究生,主要研究面向智能制造的质量保证技术;



何文辉(1973—),男,博士,副教授,主要研究特种机器人技术,面向智能制造的质量保证技术,3063284308@qq.com。