



北京航空航天大学  
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

# 《加速试验综合实践》 实验报告

实验地点	为民楼 210 室
学生姓名	华广斌
学 号	SY2214108
实验日期	2022 年 4 月 26 日

2022 年 6 月 1 日

## 目 录

一、	实验方案设计.....	1
1.1	应力极限确认试验.....	1
1.1.1	试验剖面.....	1
1.1.2	具体步骤.....	1
1.2	恒定应力加速试验.....	1
1.2.1	加速应力水平设置.....	1
1.2.2	具体步骤.....	2
二、	实验设备检测仪器及其连接图.....	2
2.1	实验设备及仪器.....	2
2.2	设备连接图.....	1
三、	实验实施过程.....	2
3.1	实验步骤.....	2
3.1.1	应力极限确认试验.....	2
3.1.2	恒定应力加速试验.....	2
3.2	实验结果.....	3
3.2.1	应力极限确认试验.....	3
3.2.2	恒定应力加速试验.....	3
四、	实验数据处理与分析.....	3
4.1	电机失效机理分析.....	3
4.2	电机加速寿命试验数据分析.....	5
4.2.1	最小二乘估计.....	5
4.2.2	极大似然估计.....	8
五、	附录 C 和附录 D 中案例计算结果的复现.....	9
5.1	附录 C 灯泡案例计算结果的复现.....	9
5.1.1	最小二乘估计.....	10
5.1.2	极大似然估计.....	13
5.2	附录 C 高频接收装置案例计算结果的复现.....	14
5.3	附录 D 轴承振动信号处理计算结果的复现.....	15

六、	总结.....	18
七、	课程建议.....	18
八、	附录.....	19

## 一、 实验方案设计

### 1.1 应力极限确认试验

#### 1.1.1 试验剖面

遵循“低应力水平下大步长，高应力水平下小步长”的设计准则，设计电压应力极限确认试验剖面图如图 1 所示。试验在基准条件 1.5V 下开始，以 0.3V 的应力步长，步进至 2.1V；再以 0.2V 的应力步长，由 2.1V 步进至 2.3V；接着由 2.3V 开始，以 0.1V 为步长进行步进，直至电机失效。步进时长为 5min。

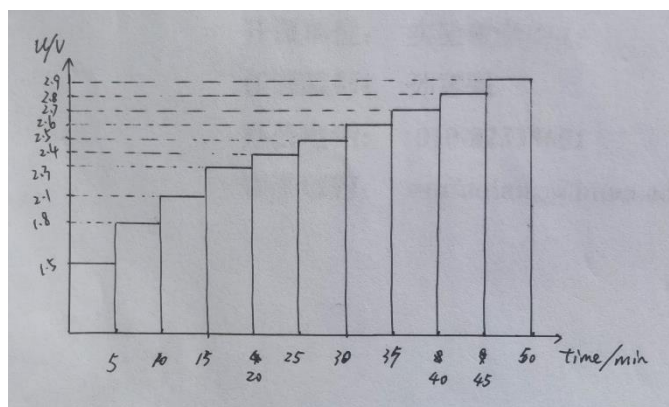


图 1 电压应力极限确认试验剖面图

#### 1.1.2 具体步骤

具体试验步骤如下：

- 1) 连接电机与直流稳压电源，固定电机，检查电机是否可以正常工作。记录电机编号。
- 2) 依据试验剖面，按顺序进行应力施加。每次改动应力值的时候，应停止电源供电，设置完成后再打开电源进行供电。记录电机通电时间和电压水平。
- 3) 依次进行每个应力水平下的测试，直至电机破坏（停止转动）。记录失效时间、电机状况和电压水平。

### 1.2 恒定应力加速试验

#### 1.2.1 加速应力水平设置

此次试验总体在 2.2、2.3、2.4、2.5、2.6 和 2.7V，共 6 个加速应力水平下进行。本试验小组采用的加速应力水平为 2.2V。

### 1.2.2 具体步骤

具体试验步骤如下：

- 1) 依据应力极限确认试验的结果，在极限应力范围内，选择合适应力大小作为加速应力。
- 2) 连接试验电机与传感器、电源、数据采集器等。
- 3) 设置试验系统参数，检查设备是否连接正确，记录信号采集的通道编号。
- 4) 开始试验，记录试验开始时间。
- 5) 电机失效后停止供电，记录失效时间。
- 6) 直至电机全部失效，试验结束。保存数据并关闭信号采集设备等设备，整理仪器。

## 二、 实验设备检测仪器及其连接图

### 2.1 实验设备及仪器

本试验小组用到的实验设备及仪器如表 1 所示。

表 1 实验设备

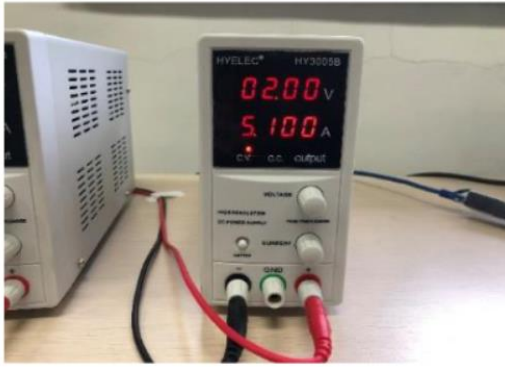
设备名称	设备型号	数量	对应图
有刷直流永磁电机	PZB130	5	图 2(a)
加速度传感器	TC14236	3	图 2(b)
可调式直流稳压电源	HY3005B	3	图 2(c)
16 路数据采集器	iPotest-16I	1	图 2(d)



(a)



(b)



(c)



(d)

图 2 实验设备与仪器

## 2.2 设备连接图

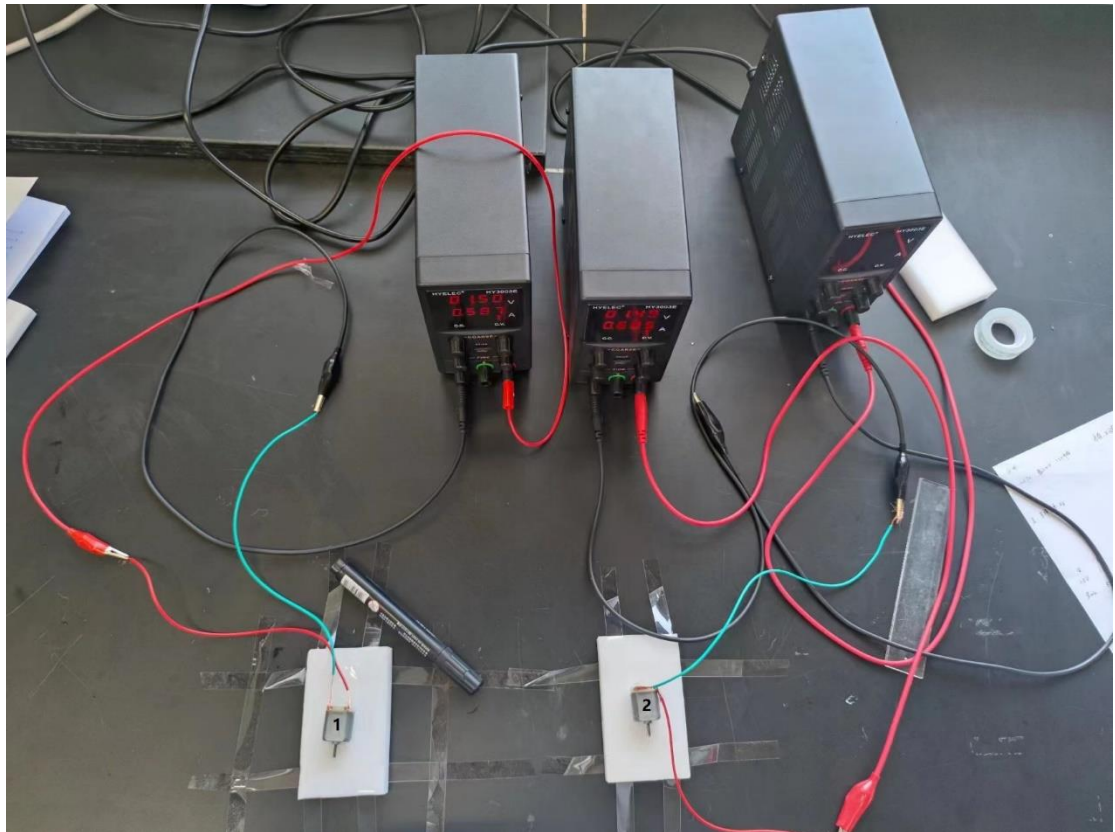


图 3 应力极限确认试验设备连接图

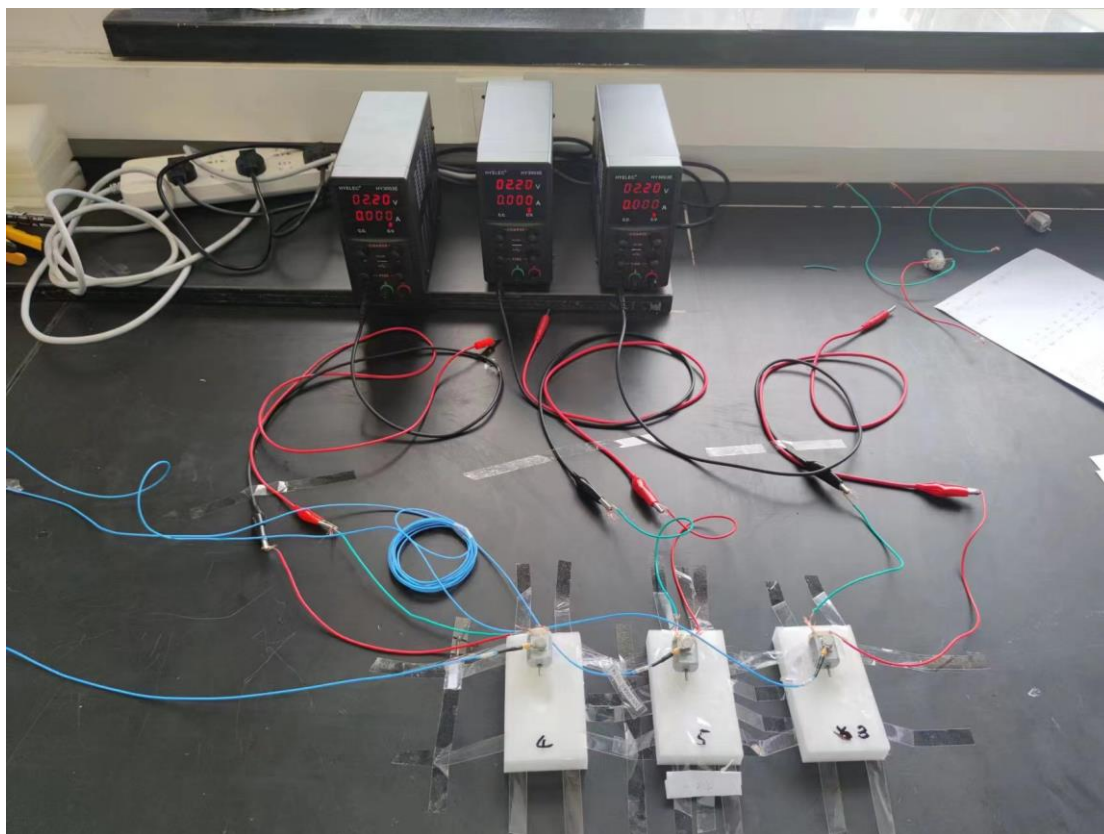


图 4 恒定应力加速试验设备连接图

### 三、 实验实施过程

#### 3.1 实验步骤

##### 3.1.1 应力极限确认试验

- 1) 连接电机与直流稳压电源，固定电机，检查电机是否可以正常工作。记录电机编号。本试验中使用 2 台电机进行试验，编号分别为 G-06-01 和 G-06-02。
- 2) 依据试验剖面，按顺序进行应力施加。试验开始时间为 2023 年 4 月 26 日 9:41，初始应力水平为 1.5V。每次改动应力值的时候，应停止电源供电，设置完成后再打开电源进行供电。记录电机通电时间和电压水平。
- 3) 依次进行每个应力水平下的测试，直至电机破坏（停止转动），记录失效时间、电机状况和电压水平。两台电机最终分别于同天的 10:25 和 10:21 失效。

##### 3.1.2 恒定应力加速试验

- 1) 依据应力极限确认试验的结果，在极限应力范围内，选择合适应力大小



作为加速应力。本试验小组采用的加速应力水平为 2.2V。

- 2) 连接试验电机与传感器、电源、数据采集器等。本试验中使用 3 台电机进行试验, 编号分别为 G-06-03、G-06-04 和 G-06-05, 对应的数据采集通道为 12, 10 和 11。
- 3) 设置电压为 2.2V, 信号采样频率为 4K, 检查设备连接正确后开始试验, 试验开始时间为 2023 年 4 月 26 日 11:31。
- 4) 电机失效后停止供电, 记录失效时间, 三台电机分别于同天的 14:15、13:56 和 12:05。
- 5) 直至电机全部失效, 试验结束。保存数据并关闭信号采集设备等设备, 整理仪器。

## 3.2 实验结果

### 3.2.1 应力极限确认试验

在本小组试验中, 电机 G-06-01 在 2.7V 应力水平时有异响(沙砾声)、白烟, 振动不稳, 前端塑料与壳体间隙加大, 判定为失效; 电机 G-06-02 在 2.8V 应力水平时有异响, 振动不稳, 前端塑料部分融化, 判定为失效。

### 3.2.2 恒定应力加速试验

在本小组试验中, 应力水平为 2.2V。

电机 G-06-03 在施加应力 164 min 后, 振动不稳, 有金属片蹦出, 判定为失效, 拆开机体后发现换向器有一半因磨损脱离主体; 电机 G-06-04 在施加应力 145 min 后, 电流降为 0, 判定为失效, 拆开机体后发现换向器完全断裂; 电机 G-06-05 在施加应力 34 min 后, 出现异响, 振动剧烈且不稳, 出现沙砾声, 持续出现白烟, 判定为失效, 拆开机体后发现换向器上有明显犁沟。

## 四、实验数据处理与分析

### 4.1 电机失效机理分析

图 5 和图 6 分别为应力极限确认试验和恒定应力加速试验的电机拆解图, 其中最左侧为未进行试验的电机结构。





图 5 应力极限确认试验的电机拆解图



图 6 恒定应力加速试验的电机拆解图

根据直流电动机的工作原理，有刷直流永磁电机使用的电刷和换向器，作为导入或导出电流的滑动接触体，用于在电机定子和转子之间传导电流，它们是电机中唯一的一对滑动摩擦部件，所经受的磨损程度最为严重，因此它们的工作状况直接影响着电机工作的可靠性和寿命，是有刷直流永磁电机的薄弱环节。

由拆解图可以看出，所有失效电机的换向器与电刷接触部分均已断裂脱落，电刷部分也受到磨损。失效的原因是换向器与电刷接触部分分离而无法在电机定子和转子之间传导电流。该型电机薄弱环节中的关键元件是换向器而非电刷。换向器磨损主要是由机械和电气两方面因素引起，机械因素为电刷和换向器的相对滑动产生粘着磨损，其摩擦产生的热使得润滑剂逐渐失效，导致粘着磨损加剧且磨屑增加，进一步引发了磨粒磨损。电气因素为在电流的作用下，电机输入的电功率一部分转换成了热量，由于电机内部散热不良导致其温度随运行时间逐渐上升（这一点可以从电机前端塑料融化看出），而换向器的铜金属硬度随温度上升

而降低，导致了磨粒磨损和粘着磨损的加剧。综上，换向器磨损的过程中，机械和电气因素使换向器磨损逐渐加剧，而润滑作用、磨粒磨损、氧化作用和电火花作用导致不均匀磨损。

4.2 电机加速寿命试验数据分析

电机加速寿命试验失效数据如图 7 所示。

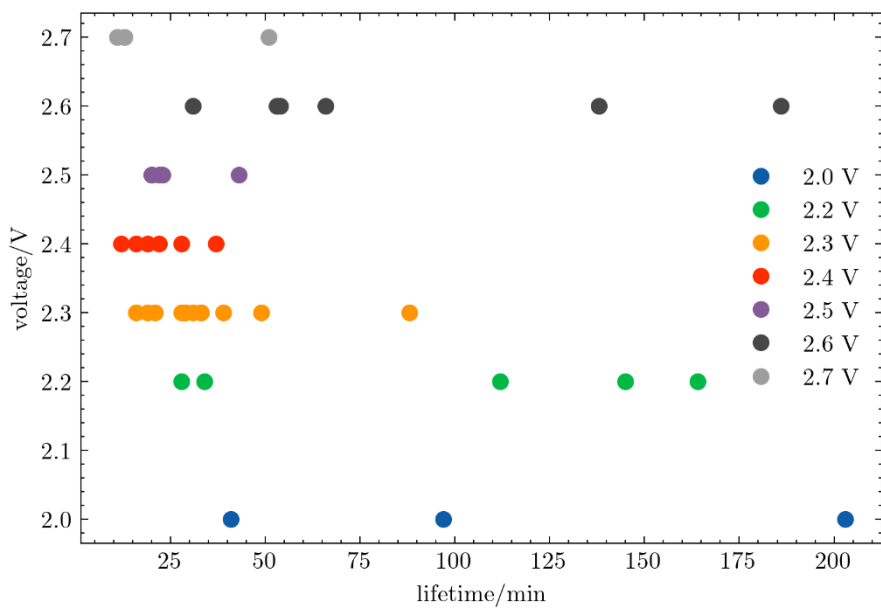


图 7 电机加速寿命试验失效数据图示

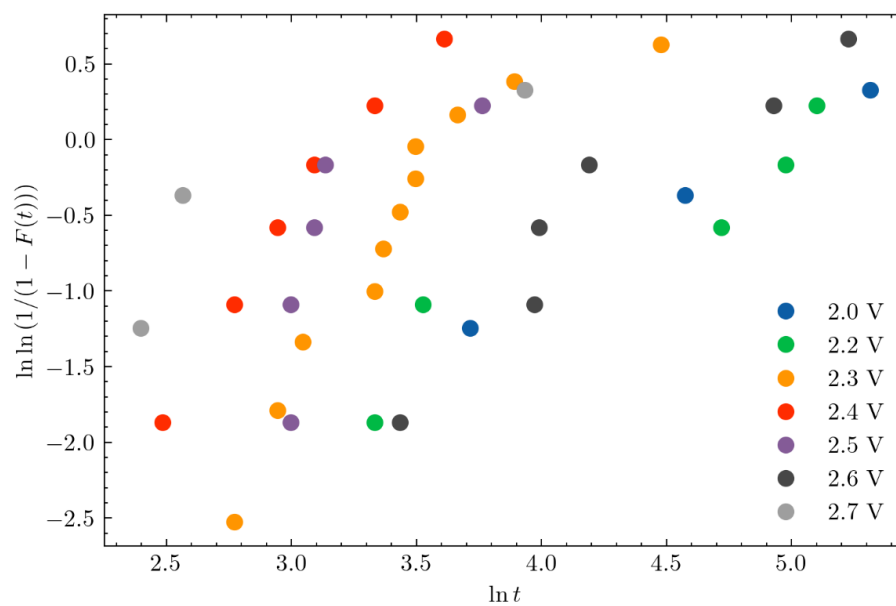
4.2.1 最小二乘估计

对电机加速寿命试验失效数据进行数学变化后， $\ln\ln(1/(1-F(t_{ij})))$ 计算结果如表 2 所列，及图 8 所示。其中，删除去了三个截尾数据。

表 2 经验分布函数值

电压/V	序号	$\ln\ln(1/(1-F(t_{ij})))$	电压/V	序号	$\ln\ln(1/(1-F(t_{ij})))$
2.0	1	-1.25	2.4	1	-1.87
	2	-0.37		2	-1.09
	3	0.33		3	-0.58
2.2	1	-1.87		4	-0.17
	2	-1.09		5	0.23
	3	-0.58		6	0.67
	4	-0.17	2.5	1	-1.87
	5	0.23		2	-1.09

2.3	1	-2.53		3	-0.58
	2	-1.79		4	-0.17
	3	-1.34		5	0.23
	4	-1.00		1	-1.87
	5	-0.72		2	-1.09
	6	-0.48	2.6	3	-0.58
	7	-0.26		4	-0.17
	8	-0.05		5	0.23
	9	0.16		6	0.67
	10	0.38		1	-1.25
	11	0.63	2.7	2	-0.37
				3	0.33

图 8 ( $\ln t_{ij}, \ln \ln(1/(1-F(t_{ij})))$ )构成的数对

应力水平  $S_i$  下的  $m_i$  和  $\eta_i$  的最小二乘估计, 结果见表 3。

表 3 应力水平  $S_i$  下的  $m_i$  和  $\eta_i$  的最小二乘估计结果

应力/V	$m$	$B$	$\eta$
2.0	0.984	4.89	143.933
2.2	0.922	4.689	161.688
2.3	1.89	7.15	43.959

2.4	2.268	7.361	25.692
2.5	1.908	6.792	35.188
2.6	1.31	6.088	104.308
2.7	0.825	2.875	32.598

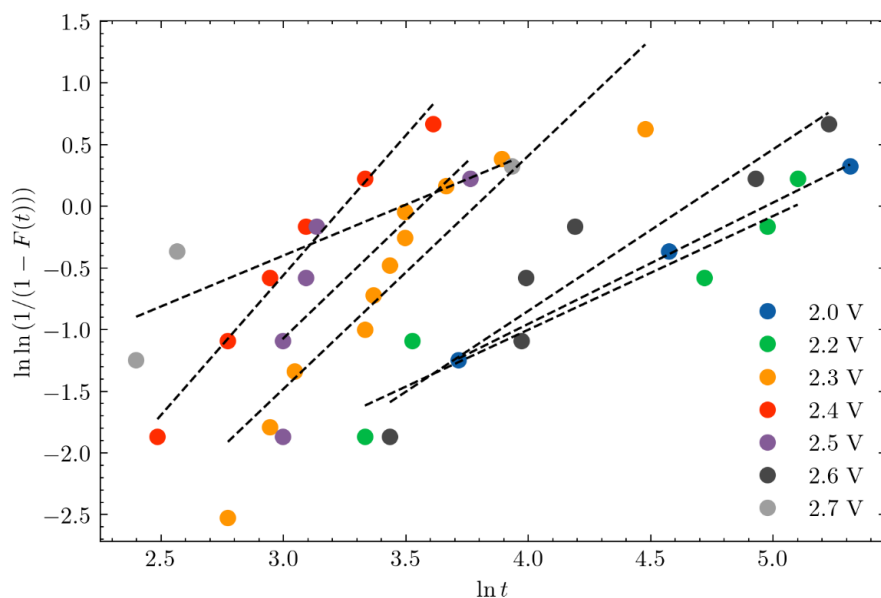


图 9 分布直线拟合结果

威布尔分布参数  $m$  的估计计算如下：

$$\hat{m} = \frac{n_1 \hat{m}_1 + n_2 \hat{m}_2 + \cdots + n_k \hat{m}_k}{n_1 + n_2 + \cdots + n_k} = 1.5846.$$

加速模型中系数  $a$  与  $b$  的估计如图 10 和表 4 所示。

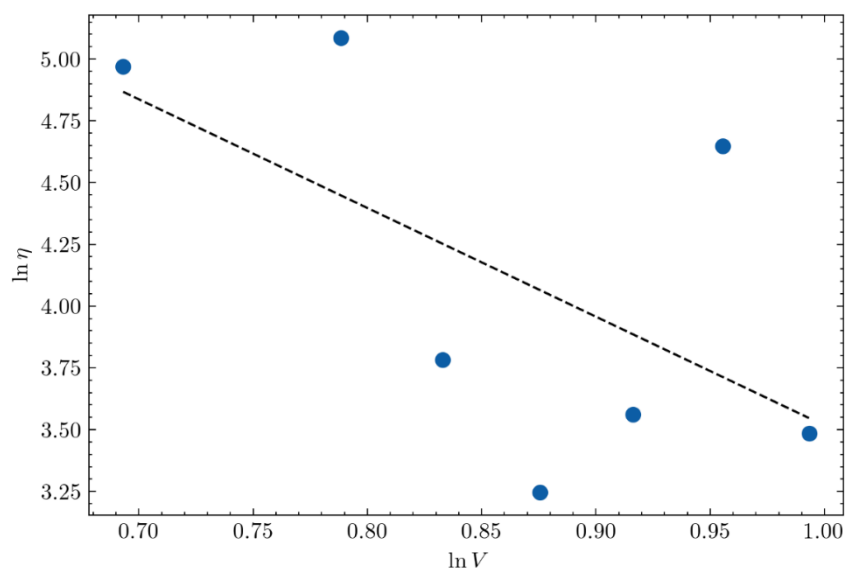


图 10 电应力和寿命特征间的关系曲线

表 4 加速模型参数估计值

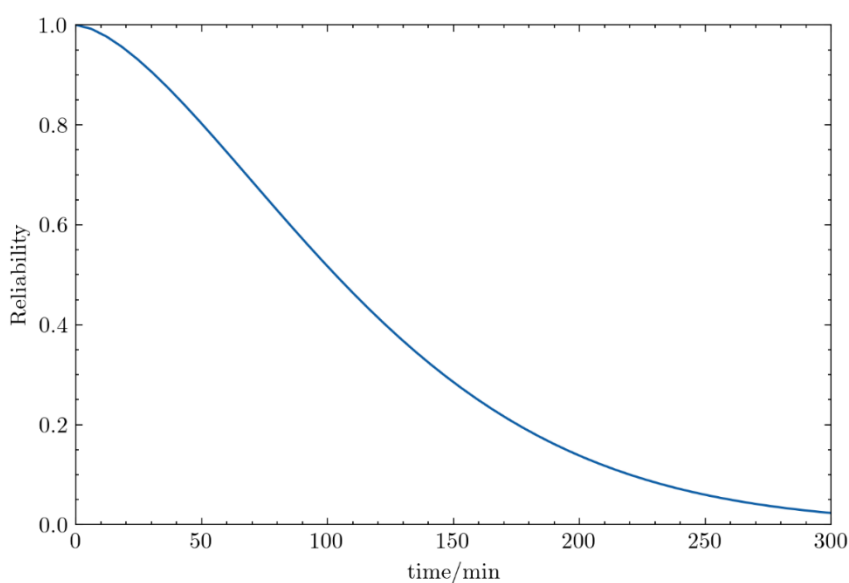
加速模型参数	$a$	$b$
参数估计值	7.92	-4.40

正常应力水平  $S_0=2V$  下分布参数及可靠性指标的估计

$$\hat{m}_0 = 1.5846,$$

$$\hat{\eta}_0 = 129.9403.$$

可得到灯泡在正常应力水平下的可靠度曲线如图 11 所示。其中，产品的中位寿命为 103 分钟。

图 11 正常应力水平  $S_0$  下可靠度曲线（最小二乘估计）

#### 4.2.2 极大似然估计

对电机加速寿命试验数据采用极大似然估计方法进行威布尔分布参数估计，结果见表 5。正常应力  $S_0=2V$  下灯泡的可靠度如图 12 所示，可以看到，两种估计方法得到结论很相近。采用极大似然估计得到的中位寿命值为 75 分钟。

表 5 极大似然方法估计值

模型参数	$m$	$a$	$b$	$\eta_0$
估计值	1.1089	6.4078	-2.5330	104.8

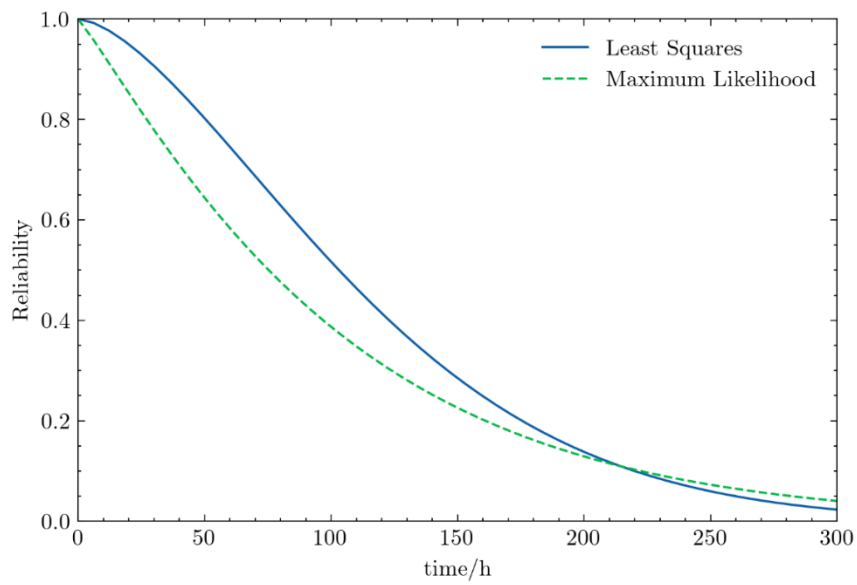


图 12 正常应力水平  $S_0$  下可靠度曲线（极大似然估计）

五、 附录 C 和附录 D 中案例计算结果的复现

具体代码见附件或 [GitHub 代码仓库](#)。由于计算精度不同，部分结果与指导书不一致。

5.1 附录 C 灯泡案例计算结果的复现

从某批灯泡中任取 70 个，均分为 5 组进行 5 个电应力水平的恒定应力全数加速寿命试验，失效数据如表 6 所列及图 13 所示。采用威布尔分布对这组数据进行统计分析。

表 6 灯泡加速寿命试验失效数据（单位：小时）

序号 应力	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6.3v	181.3	288.4	1178	1511	1706	1723	1964	3157	3224	3483	3555	4939	5443	7807
6.5v	108.2	335	433.1	496.4	541.2	820.6	922.3	928.6	1053	1517	1520	1952	1954	5176
7.0v	39.68	212.3	250.8	261.3	320.9	374.8	524.6	626.6	724.6	830.8	884.6	1113	1301	1303
7.5v	59.06	74.06	134.9	180.1	201.4	226.5	235.3	237	281.5	288.1	356.1	420.5	513.2	533.9
8.0v	31.73	35.4	36.07	43.07	60.18	65.75	78.7	96.61	105.4	132.6	168.5	191.4	218.3	251.6

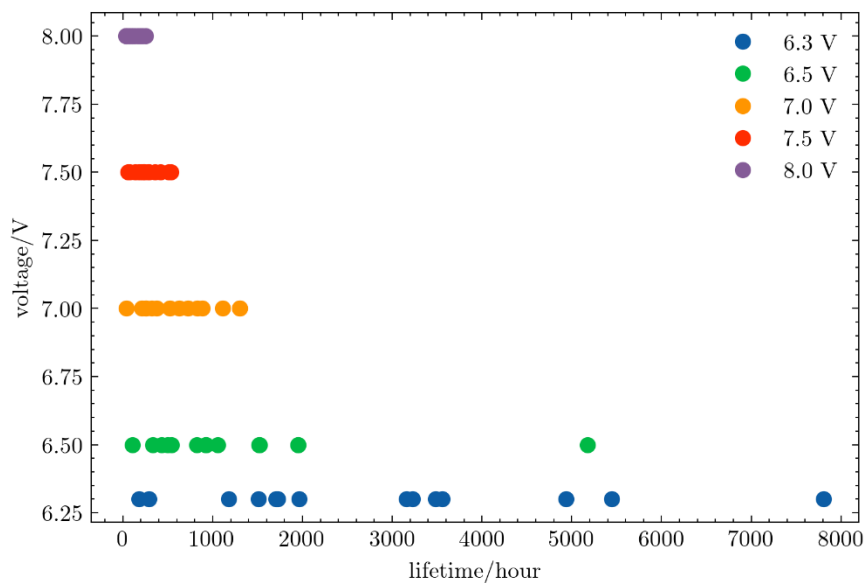


图 13 灯泡加速寿命试验失效数据图示

### 5.1.1 最小二乘估计

对灯泡加速寿命试验失效数据进行数学变化后， $\ln\ln(1/(1-F(t_{ij})))$  计算结果如表 7 所列，及图 14 所示。

表 7 经验分布函数值

序号	$\ln\ln(1/(1-F(t_{ij})))$	序号	$\ln\ln(1/(1-F(t_{ij})))$
1	-2.67	8	-0.27
2	-1.94	9	-0.09
3	-1.50	10	0.09
4	-1.17	11	0.28
5	-0.90	12	0.48
6	-0.67	13	0.70
7	-0.46	14	1.00



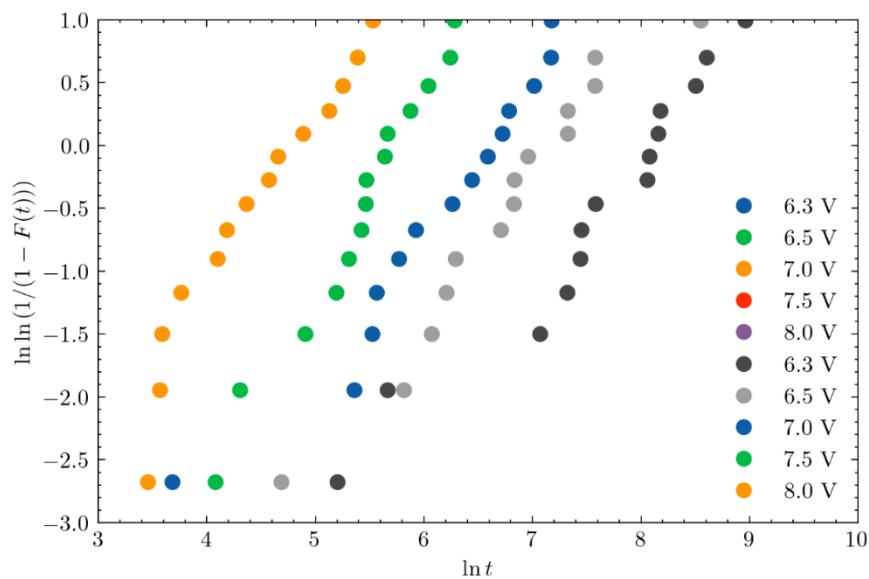


图 14  $(\ln t_{ij}, \ln \ln(1/(1-F(t_{ij}))))$ 构成的数对

应力水平  $S_i$  下的  $m_i$  和  $\eta_i$  的最小二乘估计，结果见表 3。

表 8 应力水平  $S_i$  下的  $m_i$  和  $\eta_i$  的最小二乘估计结果

应力/V	$m$	$B$	$\eta$
6.3	0.956	7.766	3375.607
6.5	1.09	7.891	1388.671
7	1.078	7.132	745.848
7.5	1.588	9.117	311.421
8	1.424	6.861	123.666

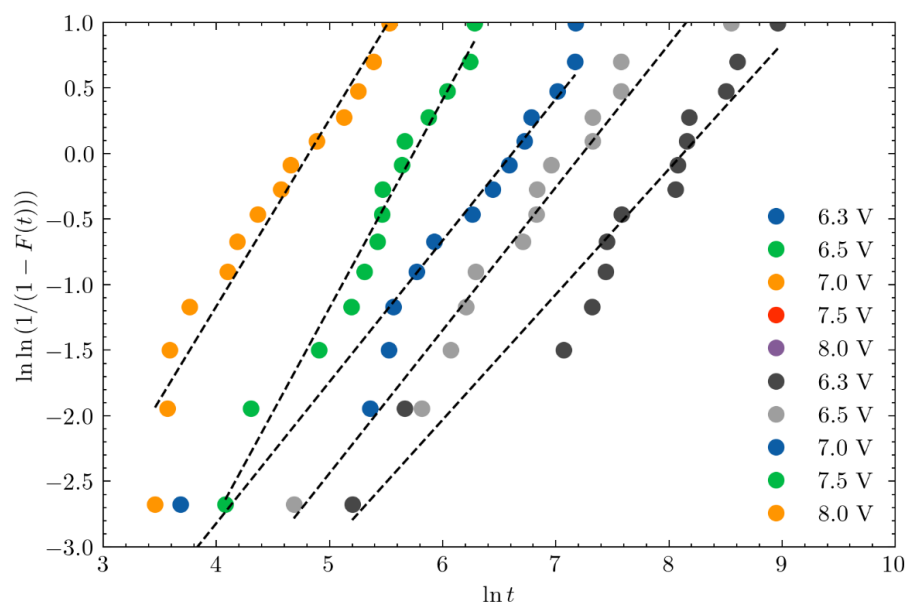


图 15 分布直线拟合结果

威布尔分布参数  $m$  的估计计算如下。

$$\hat{m} = \frac{n_1 \hat{m}_1 + n_2 \hat{m}_2 + \cdots + n_k \hat{m}_k}{n_1 + n_2 + \cdots + n_k} = 1.2273.$$

加速模型中系数  $a$  与  $b$  的估计如图 16 和表 9。

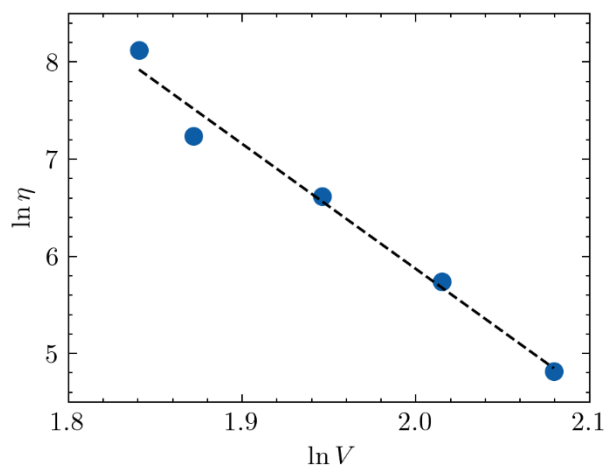


图 16 电应力和寿命特征间的关系曲线

表 9 加速模型参数估计值

加速模型参数	$a$	$b$
参数估计值	31.61	-12.87

正常应力水平  $S_0 = 6 \text{ V}$  下分布参数及可靠性指标的估计

$$\hat{m}_0 = 1.2273,$$

$$\hat{\eta}_0 = 5165.3851.$$

可得到灯泡在正常应力水平下的可靠度曲线如图 17 所示。其中，产品的中位寿命为 3832 小时。（如果使用指导书精度，则该值为 3863 小时）

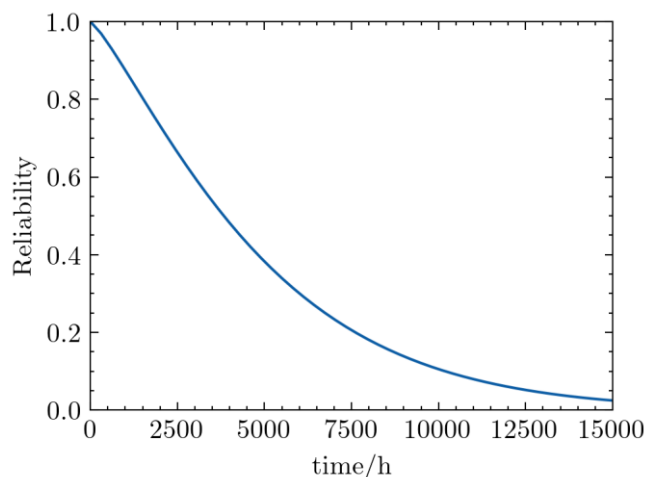


图 17 正常应力水平  $S_0$  下可靠度曲线（最小二乘估计）

### 5.1.2 极大似然估计

对灯泡加速寿命试验数据采用极大似然估计方法进行威布尔分布参数估计，结果见表 5。正常应力  $S_0=6\text{ V}$  下灯泡的可靠度如图 18 所示，可以看到，两种估计方法得到结论很相近。采用极大似然估计得到的中位寿命值为 4106 小时。

表 10 极大似然方法估计值

模型参数	$m$	$a$	$b$	$\eta_0$
估计值	1.4533	32.2777	-13.2302	5283.5

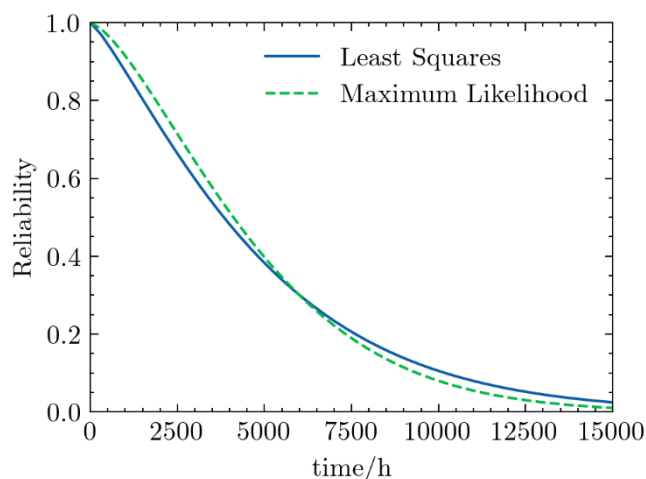


图 18 正常应力水平  $S_0$  下可靠度曲线（极大似然估计）

## 5.2 附录 C 高频接收装置案例计算结果的复现

某高频接收装置产品具有长寿命高可靠性的特点,根据退化机理分析结论,确定其薄弱环节是功率放大模块,敏感应力是温度。在温度的影响下其性能参数“功率增益”的退化失效机理具随时间和应力变化的规律,即具有可加速性,因此采用温度作为高频接收装置的加速试验应力,并利用 Arrhenius 加速模型描述功率增益退化率与温度应力之间的数学关系。

该装置退化数据如图 19 所示。

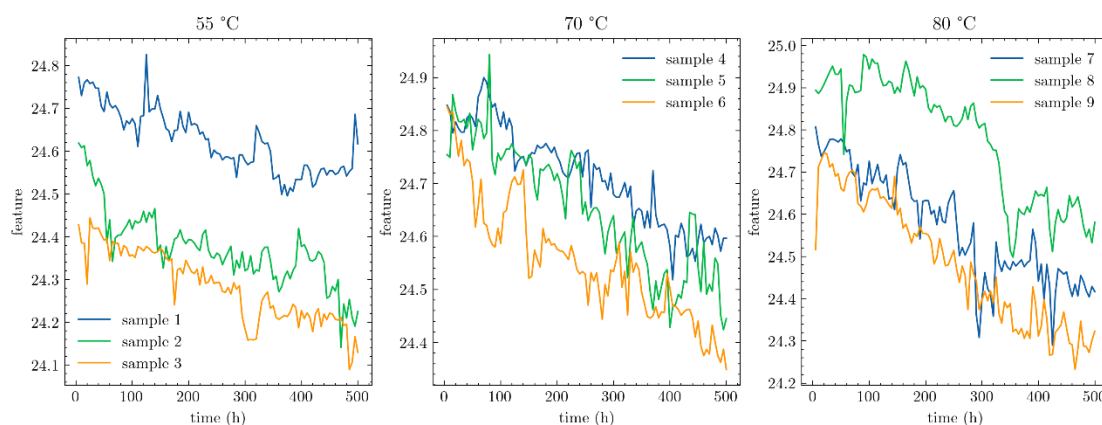


图 19 某高频接收装置加速退化试验数据

加速模型的参数  $a$ 、 $b$  的估计值和退化模型参数  $\sigma$  的估计值见表 11。

表 11 加速模型参数估计结果

$a$	$b$	$\sigma$
0.7849	-2764	0.018

产品的可靠度估计如图 20 所示。计算可得到高频接收装置的平均寿命为 45392 小时。(如果使用指导书精度,则该值为 45468 小时)

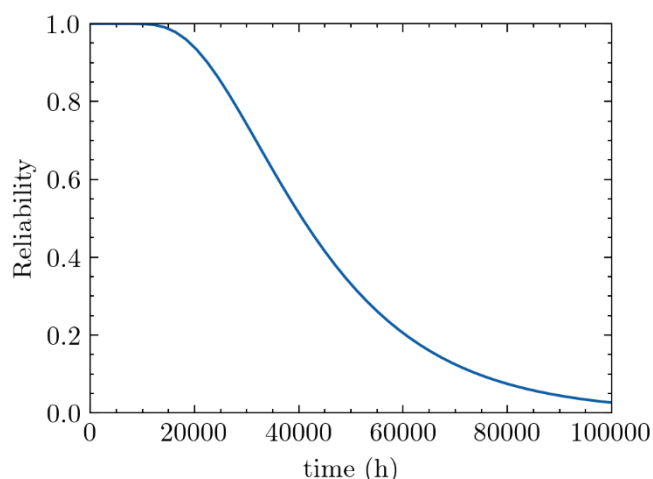


图 20 高频接收装置可靠度估计结果

### 5.3 附录 D 轴承振动信号处理计算结果的复现

选取 NASA 提供的轴承振动实测数据作为案例,通过对轴承振动响应信号进行时域和频域处理,提取能够表征电机性能运行状态的特征参数,为此轴承的剩余寿命预测提供基础。

首先对轴承的振动响应信号进行时域分析,分别计算其峰峰值、RMS 值(有效值)、脉冲指标、峰值指标、裕度指标、峭度指标、波形指标、歪度指标等 8 个时域统计参数作为产品状态特征,结果如图 21 所示。

采用频域分析提取得到的全频域能量也能够在一定程度上反映产品性能状态的变化。对该轴承振动信号进行频域分析,其试验过程中振动的全频域能量变化如图 22 所示。

采用 PCA 对轴承特征参数处理的结果如图 23 所示,累计贡献率见表 12 和图 24,本文选择主成分的依据是累计贡献率大于 90%。

图 25 给出了轴承振动特征参数第一个主成分数据的线性拟合结果,可以看出具有非常明显的趋势。

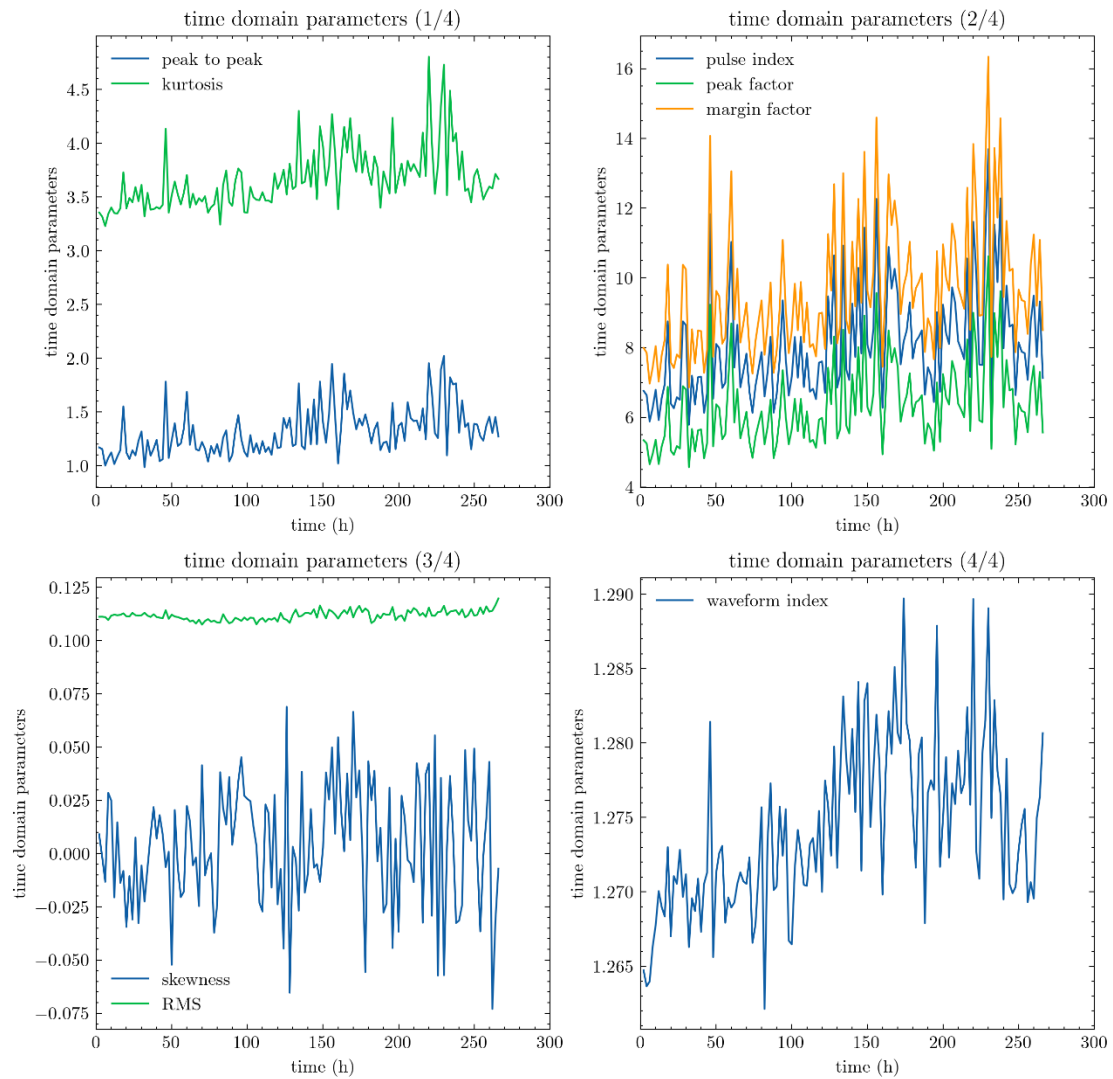


图 21 轴承振动时域参数

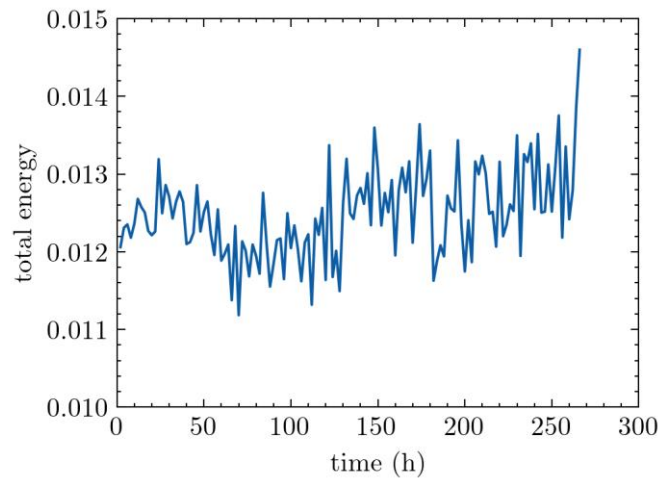


图 22 轴承试验过程中全频域能量变化

表 12 轴承特征参数 PCA 的累计贡献率

主成分序号	1	2	3
-------	---	---	---

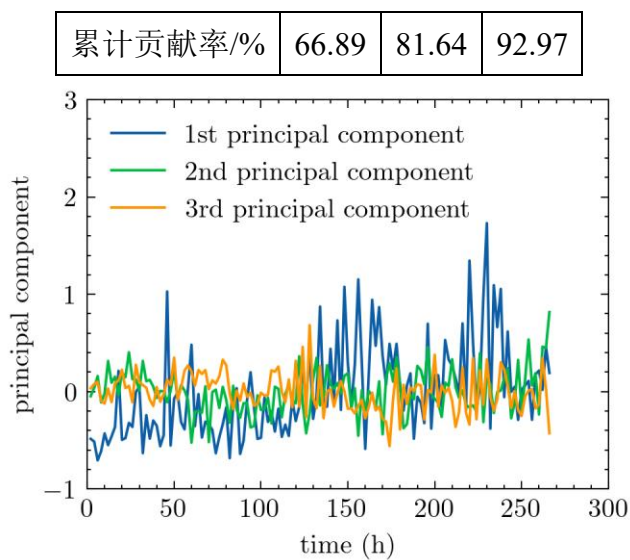


图 23 轴承特征参数 PCA 降维结果

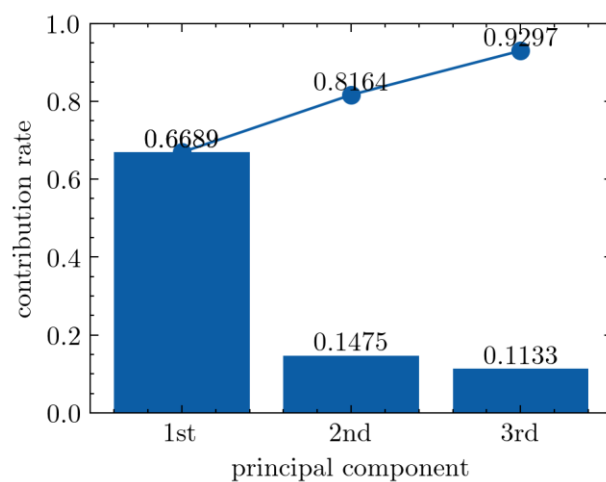


图 24 轴承特征参数 PCA 贡献率的 Pareto 图

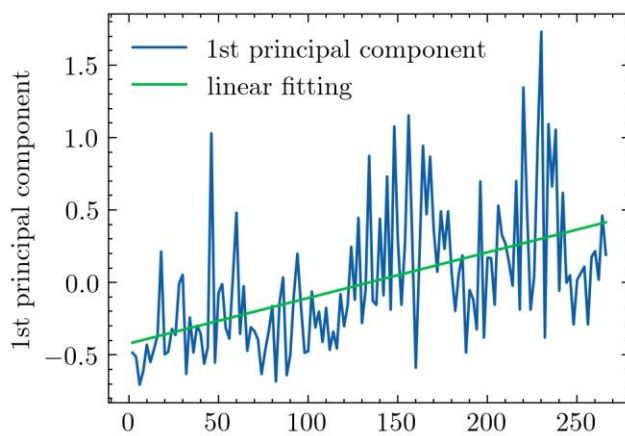


图 25 第 1 个主成分的趋势拟合结果



## 六、 总结

本次加速试验，完成了加速试验方案设计、传感器信号采集与处理，并进行了试验数据分析。

通过应力极限确认试验，确定了试验型号电机的应力极限约为 2.7V；通过加速寿命试验，确定了试验型号电机寿命的威布尔分布的具体参数。最小二乘估计得参数为  $m_0=1.5846$ ， $\eta_0=129.9403$ ，中位寿命为 103 分钟；极大似然估计得参数为  $m_0=1.1089$ ， $\eta_0=104.8$ ，中位寿命为 75 分钟。因未能获取有效的振动监测数据，未进行电机加速退化试验数据分析。从已有的数据分析结果来看，该批次电机个体差异性大，电应力与寿命特征间的关系偏差较大，难以保证最终结果的有效性。计算结果需要额外的试验进行验证。

本次试验加深了对加速试验理论内容的理解，并将其应用于实际，提高了综合试验设计能力。

## 七、 课程建议

建议统一电机失效的判别标准。试验过程中，多数电机即便在产生异响、前端部分融化或有碎片从机体脱出的条件下，仍可以继续转动。因此，各组的失效判别标准可能存在差异，本组以振动失稳作为判据，部分试验组以电流激增作为判据。而电流剧烈变化在本组低应力水平时就被观察到，但此时电机仍可继续转动，未被判为失效。失效判别标准不统一可能是此次试验数据一致性较差的原因之一，建议在后续试验中统一电机失效标准。

八、 附录

表 13 电机应力极限确认试验记录表

附录 A 电机应力极限确认试验记录表

日期 2023年4月26日 地点 为层楼 210室

应力极限确认试验操作检查表					
实验操作	是	否	实验操作	是	否
实验设备连接完成	✓		实验方案设计完成	✓	

应力极限确认试验数据记录表							
应力水平	电机编号	G-06-01	G-06-02	应力水平	电机编号	G-06-01	G-06-02
1.5V	开始时间	9:41	9:41	2.5V	开始时间	10:06	10:06
	结束时间	9:46	9:46		结束时间	10:10	10:10
	电机状况	正常	正常		电机状况	正常 (电流0.8A)	正常,有异响 (电流1.0A)
1.8V	开始时间	9:46	9:46	2.6V	开始时间	10:11	10:11
	结束时间	9:51	9:51		结束时间	10:16	10:16
	电机状况	正常	正常		电机状况	正常	有异响,砂粒声 异响加剧,振动不稳 异响加剧,与无时间隙 异响加剧,有黑色物质从
2.1V	开始时间	9:51	9:51	2.7V	开始时间	10:16	10:16
	结束时间	9:56	9:56		结束时间	10:21	10:21
	电机状况	正常	正常		电机状况	正常	周2.6V 停止
2.3V	开始时间	9:56	9:56	2.8V	开始时间	10:21	
	结束时间	10:01	10:01		结束时间	10:25	
	电机状况	正常 (音调变高)	正常 (音调变高)		电机状况	有异响,振动加剧 异响加剧,与无时间隙	
2.4V	开始时间	10:01	10:01		开始时间		
	结束时间	10:06	10:06		结束时间		
	电机状况	正常 (音调与2.3V 相近)	正常 (音调与2.3V 相近)		电机状况		

注：“电机状况”应记录电机是否正常工作，以及出现故障的时间点和故障现象。

实验人员签字：华斌 王鹤翔

表 14 电机恒定应力加速试验记录表

附录 B 电机恒定应力加速试验记录表

日期 2023年4月26日地点 为房楼 210室

恒定应力加速试验操作检查表					
实验操作	是	否	实验操作	是	否
实验设备连接完成	✓		软件采集信号测试完成	✓	
软件设置完成	✓		采样频率	4K	
恒定应力加速试验数据记录表					
通道编号	12		10	11	
电机编号	G-06-03		G-06-04	G-06-05	
应力水平	2.2V		2.2V	2.2V	
开始时间	11:31		11:31	11:31	
结束时间	14:15		13:56	12:05	
应力施加时长	164 min		145 min	34 min	
电机故障描述现象	振动不稳 有金属片跳出 拆开后发现换向器有一半磨损 损坏断裂		出现 电流降为0A 无异响 换向器完全断裂	出现异响. 振动剧烈且 不稳, 砂粒声, 持续出现自燃. 重新故障模式: 拆开后发现换向器 换向器上有明显 磨损.	
数据存储文件中列号					
数据存储地址命名					

实验人员签字: 华斌 邓锡初