

## 基于加速退化试验数据的智能电能表早期失效分析

田正其, 徐 晴, 金 萍, 祝宇楠, 刘 建, 周 超, 龚 丹

(国家电网公司电能计量重点实验室(国网江苏省电力公司电力科学研究院), 江苏 南京 210019)

**摘要:**基于加速退化试验进行智能电能表的寿命预测,是当前解决智能电能表的可靠性评估的一种有效手段。智能电能表在设计、制造过程中不可避免的引入早期失效的问题,若在开展加速退化试验工作时,不对检测得到的智能电能表性能数据进行早期失效分析,将存在早期失效的智能电能表的伪寿命数据引入寿命评估,会导致错误的寿命评估结果及不必要的后期维修更换成本、风险。针对智能电能表的加速退化试验数据处理问题,提出了一种基于加速退化试验数据的早期失效分析方法,并以某单相智能电能表为例,进行了分析验证,本文的研究进一步提升了智能电能表寿命评估的准确性。

**关键词:**加速退化;早期失效;电能表;寿命评估

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0098-04

智能电能表是连接电力部门与用户的最终计量器具,关系到双方的切身利益。随着用电信息采集系统的建设<sup>[1]</sup>,投运电能表数量越来越多,电能表的可靠性分析、寿命评估等质量把关工作就显得尤为重要。

产品设计前会通过可靠性预计工作来保证可靠性设计达到目标值,但生产过程中使用有缺陷的元器件、零部件,制作过程操作不当等会给产品带来隐性缺陷。关于早期失效分析技术,国内外相关学者都开展了研究,并取得了一定成果。杨林对汽车轮毂轴承的早期失效进行了研究,通过早期失效件的筛选、统计,建立失效件的数据分布图,并根据Lundberg-Palmgren寿命公式对轮毂轴承进行了寿命计算<sup>[2]</sup>;石青宏针对塑封功率晶体管进行了早期失效数据分析,利用MINITAB软件对数据进行处理后,分析了封装缺陷、粘结失效等失效的机理<sup>[3]</sup>。上述开展的早期失效分析工作,更多是基于筛选试验或者验证试验数据进行早期失效的机理、原因分析,从筛选试验数据中找出早期失效的原因。

近几年来,智能电能表检测机构对电能表进行检测、评价工作时,逐步采用加速退化试验的方法进行电能表的寿命评估。但是,若没有进行是否存在早期失效的数据分析工作,直接根据智能电能表的性能退化试验数据进行寿命评估,会将早期失效的样本数据引入智能电能表的寿命评估中,这样可能会导致错误的寿命预测结果。关于加速退化试验的数据处理方法的相关研究,近年来也越来越

多。Nelson研究了基于性能退化关系的寿命时间分布,给出了加速退化试验统计模型、数据分析方法等方面的内容<sup>[4]</sup>;Meeker等人给出了加速退化数据的分析方法,他们假设退化数据可以用混合影响非线性回归模型描述,使用近似极大似然估计法来估计模型参数,并提出了不同情况下估计寿命时间分布的方法<sup>[5]</sup>;Shiau等给出了非参数回归加速寿命应力(NPRALS)模型分析方法<sup>[6]</sup>;罗冉冉开展了单相智能电能表可靠性加速寿命试验研究,对试验过程中的性能退化数据进行了可靠性统计分析,并运用回归分析法、最小二乘法得到不同试验应力组合的退化轨迹方程,由此估计出产品的伪失效寿命<sup>[7]</sup>;李奕非等人开展了基于寿命应力模型的电能表加速寿命试验研究,结合Peck温湿度加速模型,进行了电能表失效寿命评估<sup>[8]</sup>。上述研究更多是直接基于加速退化试验数据进行寿命评估,没有从早期失效分析的角度给出加速退化试验过程中的数据处理方法、流程,将存在早期失效问题的试验样本数据与其他样本数据进行寿命评估,评估结果值得商榷。为此,本文基于加速退化试验数据,提出基于加速退化试验数据进行智能电能表的早期失效分析、判断的方法。该方法充分利用智能电能表的加速退化试验数据,先对加速退化试验数据进行早期失效分析,判断是否存在早期失效,若存在早期失效,需要剔除相应的数据或者重新选择样本进行加速寿命试验。

### 1 基于退化试验数据的早期失效分析方法

#### 1.1 早期失效判定依据

由于威布尔分布能体现产品的全寿命期的失效特征,包括早期失效期、偶然失效期和耗损失效

收稿日期:2016-09-12;修回日期:2016-10-30

基金项目:国家电网公司科技项目(计量装置运行状态评估与寿命诊断分析技术研究)

期,因此通过威布尔分析,往往可以判定是否存在早期失效<sup>[9]</sup>。

威布尔分布函数如下:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{t_0}\right)^m} \quad (1)$$

其概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{t_0}\right)^m} \quad (2)$$

式中: $m$ 为形状参数; $\gamma$ 为位置参数; $t_0$ 为尺度参数。威布尔分布的一个重要参数是 $m$ ,当: $m < 1$ 时,表示产品处于早期失效期; $m = 1$ 时,表示产品处于偶然失效期; $m > 1$ 时:表示产品处于耗损失效期。

根据威布尔分布 $m$ 的大小,可以判断产品是否存在早期失效。本文也正是利用这一点,进行基于退化试验数据的智能电能表早期失效分析。

## 1.2 基于退化试验数据的早期失效分析方法及流程

加速退化试验所检测到的智能电能表性能数据,是在加速应力条件下检测到的,且是在主要敏感应力加速条件下检测到的,直接应用加速应力下的性能数据进行早期失效分析,会产生误差。考虑到加速退化试验过程中,往往可以计算得到各个样本的伪失效寿命,依据这些伪失效寿命,可进行寿命分布回归分析。根据寿命分布回归分析得到的形状参数,可判定所选的试验样本是否存在早期失效。为此,本文基于加速退化试验得到的伪失效寿命数据,结合威布尔早期失效判定依据,给出基于加速退化试验数据的智能电能表早期失效分析方法,步骤如下。

步骤一:收集加速退化试验中的性能退化数据。

假设对智能电能表的 $n$ 个样品开展了加速退化试验,试验应力为温度应力,加速应力水平为 $S_k$ , $t_1, t_2, \dots, t_m$ 时刻对其进行性能退化量测量、记录,共测 $m$ 次。加速应力 $S_k$ 下产品性能的每次检测时间 $t_i$ 及检测到的性能值 $y_{ij}$ ,其中 $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ 。假设智能电能表性能阈值为 $P$ (即产品性能超过 $P$ 时判定为失效)。

步骤二:根据性能退化数据绘制性能退化轨迹并选择合适的退化模型。

根据性能退化数据,以时间 $t$ 为横坐标,性能参数 $y_i$ 为纵坐标,绘制性能退化曲线。依据性能退化曲线趋势(主要根据相关性系数进行判定),从下面3种模型选择合适的退化模型<sup>[10,11]</sup>。

$$y_i = \alpha_i + \beta_i t \quad (3)$$

$$\log(y_i) = \alpha_i + \beta_i t \quad (4)$$

$$\log(y_i) = \alpha_i + \beta_i \log t \quad (5)$$

步骤三:估计各样本性能退化模型的参数。

使用最小二乘法,根据记录的性能退化数据估计各个样本的性能退化模型的参数,即为式(3)、式(4)、式(5)中 $\alpha_i, \beta_i$ 的估计值。假设选择的退化模型为式(3),则利用性能退化数据估计出式(3)的 $\alpha_i, \beta_i$ 的估计值。

步骤四:外推计算各个样本的伪失效寿命。

假设失效阈值为 $P$ ,根据步骤三求得的样本性能退化模型,外推求出对应应力作用条件下的伪失效寿命 $T_1, T_2, \dots, T_n$ ,如图1所示。

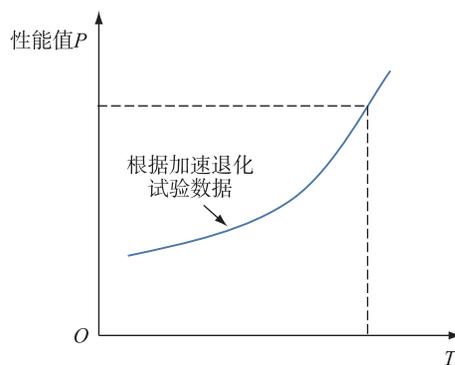


图1 性能退化轨迹

步骤五:根据伪失效寿命数据,进行分布拟合分析。

利用极大似然法或最小二乘法,根据伪失效寿命数据 $T_1, T_2, \dots, T_n$ ,进行寿命回归分析(可选择威布尔分布进行回归分析),计算出形状参数 $m$ 。

步骤六:根据分布参数进行早期失效判定。

根据形状参数 $m$ 的大小,基于威布尔分布的早期失效判断方法进行早期失效判定。若是 $m < 1$ 时,表示产品处于早期失效期,需要对性能检测数据进行筛选,剔除存在早期失效的样本数据后再进行寿命评估,或者重新选择试验样本进行加速试验,如图2所示。

## 2 实例及结果分析

本节以某款单相智能电能表进行的加速退化试验为例,说明基于加速退化试验的早期失效分析方法。该加速退化试验的试验样本为10个,在线累计试验时间为1000 h,测试的性能参数为计量模块的校表脉冲基本误差。

试验条件为温度 $70^\circ\text{C}$ ,湿度为 $85\% \text{RH}$ ,假设正常工作条件为温度 $35^\circ\text{C}$ ,湿度为 $70\% \text{RH}$ ,则依据Peck加速模型算得加速因子 $A_f$ 为17.9。

步骤一:收集加速退化试验中的性能检测数据。在试验过程中,测得10只样本的校表脉冲基本误差参数结果如表1所示。

表 1 校表脉冲基本误差参数测试结果

%

样本	测试时间及结果									
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$
1	-0.093	-0.075	-0.075	-0.051	-0.060	-0.050	-0.050	-0.059	0.030	0.035
2	-0.212	-0.158	0.312	0.515	0.524	0.525	0.512	0.543	0.576	0.580
3	-0.115	-0.050	0.078	0.250	0.140	0.129	0.346	0.583	0.591	0.595
4	-0.154	-0.052	0.015	-0.023	-0.010	0.583	0.575	0.581	0.539	0.575
5	-0.132	-0.118	-0.140	-0.122	-0.090	-0.091	-0.112	-0.110	-0.080	-0.075
6	-0.153	-0.128	-0.158	-0.132	-0.132	0.494	0.535	0.452	0.345	0.538
7	-0.160	-0.139	-0.161	-0.128	-0.152	-0.119	-0.130	-0.131	-0.089	-0.101
8	-0.171	-0.161	-0.181	-0.152	-0.160	-0.120	-0.130	-0.151	-0.121	-0.116
9	-0.155	-0.121	-0.122	-0.123	-0.140	-0.090	-0.120	-0.080	-0.060	-0.095
10	-0.152	-0.125	-0.152	-0.132	-0.100	-0.100	-0.110	-0.100	-0.080	-0.091

步骤二:根据性能退化数据绘制性能退化轨迹并选择合适的退化模型。绘制上述 10 个样本的性能退化曲线。各样本的退化曲线如图 3 所示。

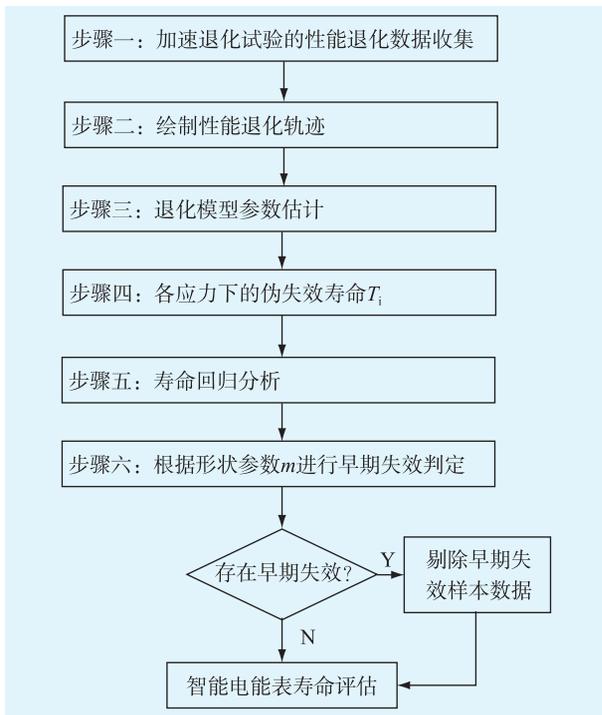


图 2 基于加速退化试验数据的早期失效分析方法

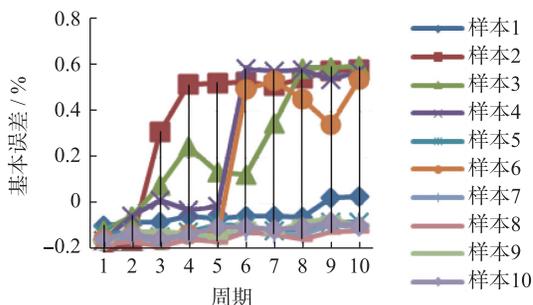


图 3 校表脉冲基本误差退化曲线

根据退化曲线形状,进行拟合优度检验。依据

退化模型式(3—5),分别对各样本的性能检测数据进行拟合优度检验分析。由于式(4)、(5)含有对数且测量得到的基本误差数据有负数,因此在进行基本误差数据处理时,使用校表脉冲基本误差测量值相对于标称值的百分比取值进行后再使用式(4)、(5)进行拟合优度检验分析。通过拟合优度检验分析,计算出相关系数。其中,样本 1 使用式(3—5)计算得到的相关系数分别为 0.844 9, 0.844 9, 0.747 3。比较 10 个样本计算得到相关系数,可知退化模型(3)、(4)的相关系数更接近 1。本文选取退化模型公式(3)作为退化模型,如图 4 所示。

步骤三:根据性能退化数据,利用退化模型(3)进行回归计算,依据表 1 中各样本性能退化数据计算退化模型中的参数  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ 。计算结果如表 2 所示。

表 2 计算伪失效寿命数据纪录表

样本	模型系数 $\alpha_i$	模型系数 $\beta_i$	相关系数 $r$	$T_i/h$
1	-0.110 8	0.012 0	0.846 0	47 896
2	-0.074 0	0.080 75	0.811 0	7118
3	-0.199 2	0.082 0	0.944 5	8292
4	-0.262 5	0.095 71	0.895 6	7618
5	-0.138 9	0.005 806	0.795 0	108 180
6	-0.340 6	0.091 976	0.851 0	8780
7	-0.166 2	0.006 412	0.817 0	101 579
8	-0.180 6	0.006 248	0.820 0	106 205
9	-0.151 8	0.007 491	0.786 0	85 306
10	-0.153 8	0.007 212	0.871 0	88 850

步骤四:根据退化模型,计算得到伪失效寿命  $T_i$ 。由于该单相智能电能表的基本误差不超过  $\pm 0.6\%$ ,所以设置基本误差阈值为  $\pm 0.6\%$ 。根据退化模型公式(3)计算出各样本的伪失效寿命,计算结果见表 2。其中,在相关性检验过程中,显著性水

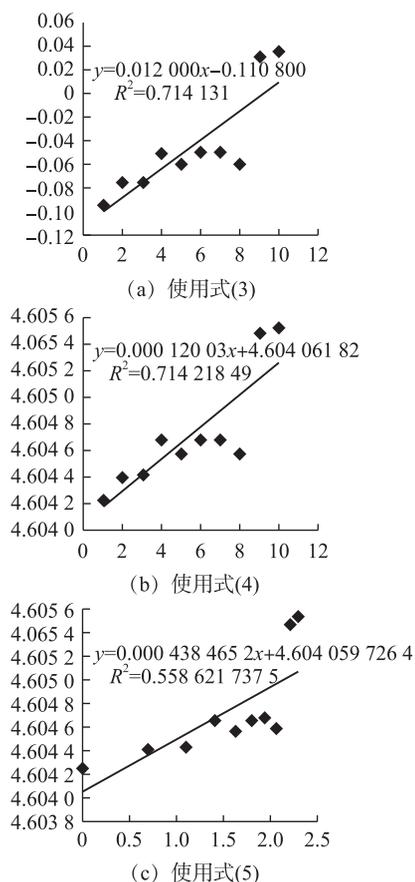


图4 样本1退化模型拟合优度检验

平 $\alpha$ 取0.01,并查数据统计表(详见文献[11]的附表A1)得到相关系数临界值 $r_\alpha=0.7079$ ,计算出相关系数 $r$ 后与 $r_\alpha$ 进行比较,从表2的数据可知,各样本计算得到的相关系数 $|r|>r_\alpha$ ,因此,利用式(3)进行线性回归计算的线性相关性是显著的。

步骤五:利用Minitab软件提供的最小二乘法,双侧置信度取95%,根据表2的伪失效寿命数据,进行寿命回归分析。选择威布尔分布进行回归分析,计算出形状参数 $m=0.995$ ,如图5所示。

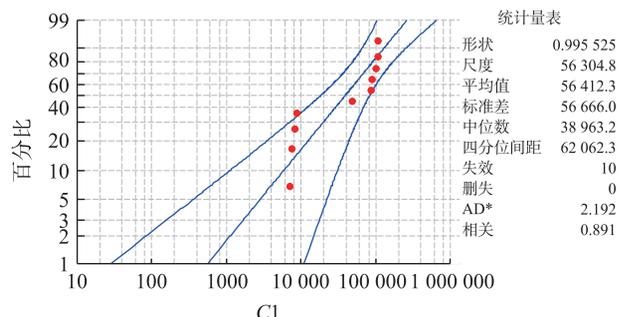


图5 寿命回归分析

步骤六:根据形状参数 $m$ 的计算结果,进行早期失效判断。步骤五计算得到 $m=0.995<1$ ,说明该试验中选择的试验样本存在早期失效问题。需对早期失效样本数据进行剔除,然后再进行寿命评估。

### 3 结束语

早期失效的存在,对高可靠、长寿命的智能电能表寿命评估工作,带来了极大的寿命量化评估隐患,甚至会引起错误的智能电能表选用决策、更换决策的制定。智能电能表检验检测机构在进行智能电能表加速退化试验时,可检测到智能电能表的性能退化数据,并可基于这些性能退化数据进行寿命量化评估。但是,在应用这些性能退化数据进行寿命评估时,需要考虑这些性能退化数据是否存在早期失效样本的数据。

针对该问题,本文给出了基于加速退化试验数据的早期失效分析判断方法。该方法对于加速退化试验数据的处理以及确保寿命评估结果的合理性具有重要作用,对于智能电能表的选用决策具有重要参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 陶 军, 吕新伟. 一种基于 SoC 的三相智能电表设计[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 38-40.
- [2] 杨 林. 汽车轮毂轴承早期失效分析及试验研究[D]. 广州:华南理工大学硕士学位论文,2012.
- [3] 石青宏. 塑封功率晶体管早期失效数据分析与对策[D]. 成都:电子科技大学硕士学位论文,2010.
- [4] NELSON W. Accelerated Testing; Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990: 54-59.
- [5] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU J C. Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis[J]. Technometrics, 1998, 40(2): 89-99.
- [6] SHIUA J H, LINH H. Analyzing Accelerated Degradation Data by NonParametric Regression[J]. IEEE Trans. On Rel., 1999, 48(2): 149-155.
- [7] 罗冉冉. 单相智能电能表可靠性加速寿命试验研究[D]. 北京:华北电力大学硕士学位论文,2012.
- [8] 李亦非. 基于寿命应力模型的电能表加速寿命试验研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(20): 167-170.
- [9] 潘 勇, 黄进永等. 可靠性概论[M]. 北京:电子工业出版社, 2015: 102-118.
- [10] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京:国防工业出版社, 2012: 63-75.
- [11] 赵 宇. 可靠性数据分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 45-58.

#### 作者简介:



田正其

田正其(1987—),男,江苏南通人,工程师,从事电力计量检测技术工作;

徐 晴(1973—),女,江苏南通人,研究员级高级工程师,从事电力计量检测技术工作;

金 萍(1968—),女,江苏徐州人,高级工程师,从事电能计量技术工作;

(下转第112页)

SFC 启动试验,对 SFC 启动流程、保护设置及启动参数进行优化,大大缩短了启动调试的时间,为同类机组的 SFC 启动试验提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈刚,廖文亮,彭永怀. 抽水蓄能机组变频启动时 3 种转子位置测量方式的比较[J]. 华东电力,2008, 36(10): 142-144.
- [2] 李集成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用[M]. 北京: 中国电力出版社,2009:415-448.
- [3] 舒建红,郑建锋. 静止变频器在抽水蓄能电站中的应用[J]. 华东电力,2010,32(8): 39-43.

- [4] DL/T 1166—2012 大型发电机励磁系统现场试验导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

#### 作者简介:



单华

单华(1985—),男,江苏扬州人,工程师,从事发电厂继电保护工作;

彭宇菲(1995—),女,江苏南京人,本科在读,专业为电气工程及其自动化;

徐钢(1967—),男,江苏扬州人,高级工程师,长期从事继电保护及励磁系统的试验研究工作。

## Application and Parameter Optimization of SFC in Pumped Storage Power Plant

SHAN Hua<sup>1</sup>, PENG Yufei<sup>2</sup>, Xu Gang<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Static frequency converter (SFC), as the variable frequency starting device of pumping conditions, is based on the speed regulator equipment. It is mainly used to apply the torque to the unit and drag it to the desired speed, so the unit can connect to the grid. This paper expounds the basic working principle, main equipment, and function of the SFC, also analyzes and summarizes the problems and solutions in the starting process.

**Key words:** static frequency converter starting device (SFC); pumping phase modulation; rotor position; parameter optimization.

(上接第 101 页)

祝宇楠(1984—),女,吉林人,博士,从事电力计量检测技术方向工作;

刘建(1981—),男,河南信阳人,高级工程师,从事电力计量检测技术工作;

周超(1987—),男,江苏宜兴人,工程师,从事电力计量检测技术工作;

龚丹(1979—),男,江苏南通人,高级工程师,从事电力计量检测技术工作。

## Early Failure Analysis of the Intelligent Watt-hour Meter Based on the Accelerated Degradation Test Data

TIAN Zhengqi, XU Qing, Jin Ping, ZHU Yunan, LIU Jian, ZHOU Chao, GONG Dan

(State Grid Key Laboratory of Electric Energy Metering (State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute), Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Life prediction based on the accelerated degradation data analysis is an effective means for the reliability evaluation of intelligent watt-hour meter. In the process of design and manufacture, the early failure problem is inevitably introduced to watt-hour meter. If the early failure analysis is ignored in the accelerated degradation test, the pseudo data will be introduced to life prediction, which will lead to wrong life evaluation and the unnecessary maintenance cost and risk. In this paper, an early failure analysis method based on the accelerated degradation test data is proposed to solve the problem of the accelerated degradation test data processing of the intelligent watt-hour meter. At last, the method is verified by the analysis of a single-phase intelligent watt-hour meter, and the life assessment accuracy of the intelligent watt-hour meter is further enhanced by this method.

**Key words:** accelerate degradation; early failure; watt-hour meter; life assessment