

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.009

基于 p 值的性能退化数据与故障数据的一致性检验方法

张福光¹, 张涵², 金慧琴², 王程民²

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学战勤学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为对产品的可靠性进行评估, 提出一种基于 p 值的性能退化数据与故障数据的一致性检验方法。详细介绍一致性检验方法的流程及特点, 以性能退化产品为对象, 采集产品故障和性能退化数据, 确定样本的伪寿命及故障数据的分布函数, 计算各伪寿命数据在分布函数中的 p 值, 通过判定规则对一致概率进行判定, 并结合实例进行验证。结果表明: 该一致性检验方法保证了性能可靠性模型的有效性, 可为性能退化数据提供参考。

关键词: 可靠性; 退化数据; 故障数据; 一致性检验

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Consistency Checking Method of Performance Degradation Data and Fault Data Based on p Value

Zhang Fuguang¹, Zhang Han², Jin Huiqin², Wang Chengmin²

(1. College of Shore Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

2. College of War Service, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to evaluate the reliability of products, a consistency test method of performance degradation data and fault data based on P-value is proposed. This paper introduces the process and characteristics of the consistency test method in detail, taking the performance degraded products as the object, collects the product failure and performance degradation data, determines the pseudo life of the samples and the distribution function of the failure data, calculates the p value of each pseudo life data in the distribution function, judges the consistency probability through the judgment rule, and verifies it with an example. The results show that the consistency test method ensures the validity of the performance reliability model and can provide reference for performance degradation data.

Keywords: reliability; degradation data; fault data; consistency test

0 引言

随着产品可靠性的提高、寿命的延长, 以及性能退化理论的发展, 在产品的可靠性评估方面, 有更多的方法倾向于利用加速寿命试验得到产品性能退化数据, 对产品的可靠性进行评估。为保证这种统计推断的可信性, 必须论证产品性能退化数据推得的伪寿命分布与产品故障数据得到的寿命分布出自于同一概率分布^[1]。笔者介绍一种基于 p 值的性能退化数据与故障数据一致性检验方法, 用于性能退化数据的有效性验证, 为可靠性模型的建立提供参考, 从而保证可靠性工作的有效进行。

1 技术方案

1.1 方案流程

提出一种基于 p 值的性能退化数据与故障数据的一致性检验方法, 步骤如下:

1) 分别采集产品故障数据和性能退化数据。

2) 确定样本的伪寿命: 对每个样本的性能退化数据进行退化轨道建模, 在给定产品失效阈值的条件下, 得到每个样本的伪寿命, 即退化轨道与失效阈值交点所对应的时间。基于性能退化数据的退化轨道建模方法可采用失效物理建模方法、退化分布建模方法、广义退化建模方法和随机过程退化建模方法中的一种或数种。

3) 确定故障数据的分布函数: 对故障数据进行概率统计分析, 确定故障数据的分布函数。故障数据分布函数的确定可采用皮尔逊检验和柯尔莫哥洛夫检验中的一种或数种。

4) 计算各伪寿命数据在分布函数中对应的 p 值: 利用确定的分布函数可知, 伪寿命数据在分布函数中对应的 p 值。

5) 比较 p 值与 α 大小: 给定显著性水平 α , 并比较各伪寿命计算出的 p 值与 α 大小。

6) 计数: 对大于 α 的 p 的个数进行计数。

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-10

作者简介: 张福光(1965—), 男, 山东人, 博士, 教授, 从事军事装备学中的导弹保障、导弹延寿、装备法规和标准研究。

E-mail: 764730455@qq.com.

7) 计算性能退化数据与故障数据的一致概率: 计算计数值占总伪寿命个数的比例, 可作为样本性能退化数据与故障数据的一致概率。

8) 对一致概率进行判定: 通过判定规则判定性能退化数据与故障数据是否具有一致性。

笔者所述的方法适用于下列产品:

① 长贮退化失效型产品: 是指在产品全寿命周期过程中, 绝大多数时间处于贮存状态的产品。该产品随着服役时间的增加, 将产生劣化、老化现象。

② 长时间连续工作退化失效型产品: 是指在产品全寿命周期过程中, 绝大多数时间处于工作状态的产品。该产品随着服役时间的增加, 将产生劣化、老化现象^[2]。

非连续工作退化失效型产品: 是指在产品全寿命周期过程中, 其一部分时间处于贮存状态、一部分时间处于工作状态、且贮存与工作状态不断交替的产品。该产品随着服役时间的增加, 将产生劣化、老化现象。

“性能退化数据”和“故障数据”, 需来自同一批次产品。基于性能退化数据的退化轨道建模方法: 使用失效物理建模方法、退化分布建模方法、广义退化建模方法和随机过程退化建模方法中的一种或数种^[3]。

这些方法的具体情况如下:

① 失效物理建模: 该方法是指通过分析导致产品失效的物理或化学机理、变化规律, 以及产品失效与使用条件(环境应力)的内在联系, 建立的相应退化轨道模型。典型的失效物理模型包括累积损伤模型、反应论模型以及基于退化率模型等^[4]。

② 退化分布建模: 该方法假设同一类产品样本的性能退化量所服从分布形势在不同的测量时刻是相同的, 分布参数随着时间变化, 通过分析得到退化量分布参数随时间的变化规律后, 即可利用性能可靠性评估方法对产品的可靠性进行评估。常用的退化量分布模型主要有正态分布模型和 Weibull 分布模型^[5]。

③ 广义退化建模: 该方法基本思想是假设退化轨道为某函数族, 用参数描述退化轨道的分布。由统计方法估计参数, 以确定退化轨道的分布, 再利用退化轨道模型求解失效时间分布, 常用的广义退化模型有线性退化模型、指数退化模型等。

④ 随机过程退化建模: 该方法认为产品的性能退化是由于产品内部不断地损伤累积造成的, 根

据损伤过程的不同性能退化过程可能是离散变化的, 也可能是连续变换的, 或者 2 种方式共同存在。常用的随机过程退化模型有 Wiener 过程和 Gamma 过程的性能退化模型等^[6]。

故障数据分布函数的确定方法: 可采用皮尔逊检验和柯尔莫哥洛夫检验中的一种或数种。

具体流程如图 1 所示。

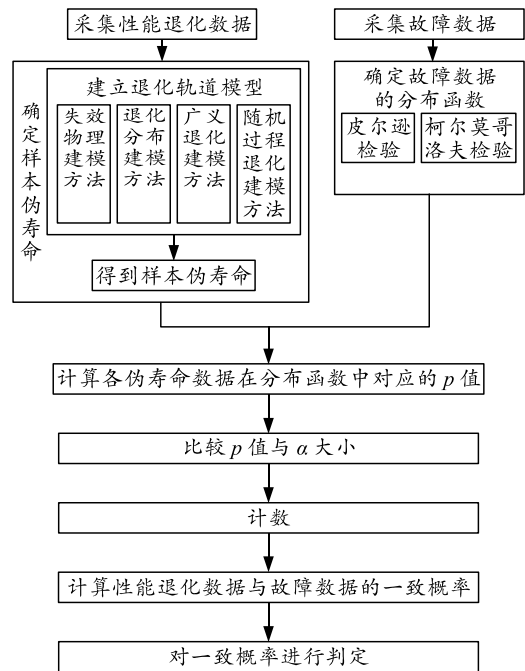


图 1 方案流程

1.2 方案优缺点

优点为:

1) 该方法在考虑充分性、必要性、符合工程习惯、可论证性、可设计性、可验证性原则的基础上, 根据性能退化数据和故障数据的特点, 选取 p 值对性能退化数据和故障数据进行一致性检验, 为可靠性模型的建立提供参考。

2) 该方法不但可用于验证样本性能退化数据和性能可靠性模型的有效性, 还可用来判断 2 组产品的技术状态是否一致。

缺点为:

该方案没有对 p 值取多个参考值进行验证, 对方案的可行性没进行对比。

2 具体实施方式

2.1 实施方法步骤

该方法是以性能退化产品为研究对象, 性能退化产品包括长贮退化失效型产品、长时间连续工作退化失效型产品和非连续工作退化失效型产品。如

图 1 所示，具体实施步骤如下：

1) 分别采集产品故障数据和性能退化数据，性能退化数据和故障数据须来自同一批次产品。样本的性能监测数据记为 $\{X_{ij}(t), i=1, \dots, n, j=1, \dots, m_n\}$ 。其中： n 为样本的个数； m 为各样本采集的数性能退化数据的个数；样本的故障数据记为 $\{t_k, k=1, \dots, q\}$ 。

2) 确定样本的伪寿命：对每个样本的性能退化数据进行退化轨道建模，得到 $x_i=F(t; \theta), i=1, \dots, n$ ；在给定产品失效阈值的条件 D_f 下，得到每个样本的伪寿命，即退化轨道与失效阈值交点所对应的时间， $t_i^* = F^{-1}(D_f; \theta), i=1, \dots, n$ 。基于性能退化数据的退化轨道建模方法可采用失效物理建模方法、退化分布建模方法、广义退化建模方法和随机过程退化建模方法中的一种或数种。

3) 确定故障数据的分布函数：对 q 个故障数据进行概率统计分析，确定故障数据的分布函数 $f(t)$ 。故障数据的分布函数的确定可采用皮尔逊检验和柯尔莫哥洛夫检验中的一种或数种。

4) 计算各伪寿命数据在分布函数 $f(t)$ 中对应的 p 值：利用 3) 确定的分布函数 $f(t)$ 可知，伪寿命数据在分布函数 $f(t)$ 中对应的 p 值。该 p 值包括：右侧 p 值，记为 $\{p_{i_{\text{右}}}^*, i=1, \dots, n\}$ ；左侧 p 值，记为 $\{p_{i_{\text{左}}}^*, i=1, \dots, n\}$ 。

5) 比较 p 值与 α 大小：给定显著性水平 α ，并比较各伪寿命，计算出 p 值与 α 大小。该显著性水平 α 应根据实际需要确定，通常取 0.05。

6) 计数：当选定单侧检验时，利用符号函数 $\text{sign}(i) = \begin{cases} 1, \min(p_{i_{\text{左}}}^*, p_{i_{\text{右}}}^*) > \alpha \\ 0, \min(p_{i_{\text{左}}}^*, p_{i_{\text{右}}}^*) \leq \alpha \end{cases}, i=1, \dots, n$ ，对 $\min(p_{i_{\text{左}}}^*, p_{i_{\text{右}}}^*)$ 大于 α 的个数进行计数，即 $N = \sum_{i=1}^n \text{sign}(i)$ ；当

选定双侧检验时，利用符号函数 $\text{sign}(i) = \begin{cases} 1, \min(p_{i_{\text{左}}}^*, p_{i_{\text{右}}}^*) > \alpha/2 \\ 0, \min(p_{i_{\text{左}}}^*, p_{i_{\text{右}}}^*) \leq \alpha/2 \end{cases}, i=1, \dots, n$ ，对 $\min(p_{i_{\text{左}}}^*, p_{i_{\text{右}}}^*)$ 大

于 $\alpha/2$ 的个数进行计数，即 $N = \sum_{i=1}^n \text{sign}(i)$ 。

7) 计算性能退化数据与故障数据的一致概率：计算计数值占总伪寿命个数的比例，即 N/n ，可作为样本性能退化数据与故障数据的一致概率^[7]。

8) 对一致概率进行判定：通过判定规则判定性能退化数据与故障数据是否具有一致性。该判定规则具体为：若一致概率 $N/n > 1-\alpha$ ，则认为对于给定的显著性水平 α ，伪寿命数据与故障数据服从同一

分布，性能退化数据与故障数据具有一致性；若一致概率 $N/n \leq 1-\alpha$ ，则认为对于给定的显著性水平 α ，伪寿命数据与故障数据来自不同分布，性能退化数据与故障数据不具有一致性。

2.2 实际案例

以 $\times \times$ 型常闭高压接触器为例，说明一种基于 p 值的性能退化数据与故障数据一致性检验方法的应用。案例所涉及产品为长时间连续工作退化失效型产品。

案例实施流程为：

1) 分别采集产品故障数据和性能退化数据，样本具体情况如下：如表 1 所示，10 个样本来自于同批次样本实验实测数据，为性能退化数据，性能参数为接触电阻。

表 1 $\times \times$ 型常闭高压接触器实验实测数据(接触电阻) mV

样本	测试时间/d				
	5	10	15	20	25
1	1.271 5	1.351 9	1.437 4	1.528 3	1.624 9
2	3.145 8	9.396 6	28.068 4	83.842 6	—
3	1.360 0	1.666 7	2.042 7	2.503 4	3.068 1
4	1.240 5	1.509 7	1.837 4	2.236 2	2.721 6
5	2.275 6	4.057 9	7.236 1	12.903 4	23.009 4
6	3.219 5	9.047 1	25.423 3	71.442 2	—
7	1.728 2	2.168 6	2.721 3	3.414 9	4.285 2
8	1.833 4	2.116 3	2.442 9	2.820 0	3.255 1
9	1.528 7	1.954 0	2.497 7	3.192 5	4.080 7
10	1.354 5	1.481 6	1.620 6	1.772 6	1.938 9

2) 确定样本的伪寿命，对每个样本的性能退化数据进行退化轨道建模。基于对数据的分析可知：该产品退化轨道为指数族，可用广义退化建模方法进行退化轨道建模。可以得到 $y_{ij}=a_i \exp(b_i t_{ij})$ $i=1, \dots, 10; j=1, \dots, 5$ ，其中： t_{ij} 为第 i 样本第 j 次测量的时间； y_{ij} 为第 i 样本第 j 次测量的接触电阻，mV； a_i 和 b_i 为第 i 样本的退化轨道模型待定参数。其参数估计结果如表 2 所示；在给定产品失效阈值的条件 $D_f=40$ mV 下，得到每个样本的伪寿命，即退化轨道与失效阈值交点所对应的时间， $t_i^* = F^{-1}(D_f; \theta), i=1, \dots, 10$ ，其样本伪寿命估计结果如表 3 所示。

表 2 $\times \times$ 型常闭高压接触器实验样本退化轨道模型参数估计结果

样本	估计结果				
	1	2	3	4	5
\hat{a}_i	1.195 9	1.053 1	1.109 7	1.019 3	1.276 1
\hat{b}_i	0.012 3	0.218 9	0.040 7	0.039 3	0.115 7
样本	6	7	8	9	10
\hat{a}_i	1.145 7	1.377 2	1.588 3	1.196 0	1.238 4
\hat{b}_i	0.206 6	0.045 4	0.028 7	0.049 1	0.017 9

表 3 ××型常闭高压接触器实验样本伪寿命估计结果
(伪寿命) d

样本	1	2	3	4	5
伪寿命	286.248 4	16.618 5	88.123 4	93.412 5	29.780 1
样本	6	7	8	9	10
伪寿命	17.193 2	74.195 1	112.398 6	71.497 3	193.768 3

3) 确定故障数据的分布函数: 对 100 对故障数据进行概率统计分析, 确定故障数据的分布函数 $f(t)$ 。本例采用柯尔莫哥洛夫检验故障数据的分布函数进行确定, 假定 H_0 为该故障数据属于指数分布, 可以得到 $D_n=0.045 8$ 。由于显著性水平 α 取 0.05 和样本量 $n=100$, 通过查询柯尔莫哥洛夫检验的临界值表得到临界值 $d_{100,0.05}=0.134 0$; 因此, 可以得到 $D_n \leq d_{n,\alpha}$, 接受假设 H_0 为该故障数据属于指数分布。利用极大似然法进行参数估计可知, 该指数分布的参数 $\hat{\theta} = 96.590 0$ 。

4) 计算各伪寿命数据在分布函数 $f(t)$ 中对应的 p 值: 由分布函数 $f(t)$ 可知, 伪寿命数据在分布函数 $f(t)$ 中对应的 p 值。该 p 值包括: 右侧 p 值, 记为 $\{p_{i_{右}}^*, i=1, \dots, n\}$; 左侧 p 值, 记为 $\{p_{i_{左}}^*, i=1, \dots, n\}$, 具体结果如表 4 所示。

表 4 伪寿命数据在分布函数 $f(t)$ 中对应的 p 值(伪寿命)

样本	1	2	3	4	5
$p_{i_{右}}^*$	0.948 4	0.158 1	0.598 4	0.619 8	0.265 3
$p_{i_{左}}^*$	0.051 6	0.841 9	0.401 6	0.380 2	0.734 7
$\min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*)$	0.051 6	0.158 1	0.401 6	0.380 2	0.265 3
样本	6	7	8	9	10
$p_{i_{左}}$	0.163 1	0.536 1	0.687 7	0.523	0.865 5
$p_{i_{右}}$	0.836 9	0.463 9	0.312 3	0.477	0.134 5
$\min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*)$	0.163 1	0.463 9	0.312 3	0.477	0.134 5

比较 p 值与 α 大小, 并计数和计算比例: 当选定单侧检验时, 利用符号函数 $\text{sign}(i)=\begin{cases} 1, \min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*) > \alpha \\ 0, \min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*) \leq \alpha \end{cases}$, $i=1, \dots, n$ 对 $\min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*)$ 大于 $\alpha=0.05$ 的个数进行计数, 即 $N_{\text{单}}=10$, $N_{\text{单}}/n=1$; 当选定双侧检验时, 利用符号函数 $\text{sign}(i)=\begin{cases} 1, \min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*) > \alpha/2 \\ 0, \min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*) \leq \alpha/2 \end{cases}$, $i=1, \dots, n$ 对 $\min(p_{i_{左}}^*, p_{i_{右}}^*)$ 大于

$\alpha/2=0.025$ 的个数进行计数, 即 $N_{\text{双}}=10, \frac{N_{\text{双}}}{n}=1$ 。

5) 对一致概率进行判定: 通过判定规则判定性能退化数据与故障数据是否具有一致性。对于单侧检验, 由于 $\frac{N_{\text{单}}}{n}=1$ 大于 $1-\alpha=0.95$, 则认为对于给定的显著性水平 $\alpha=0.05$, 伪寿命数据与故障数据服从同一分布, 性能退化数据与故障数据具有一致性; 对于双侧检验, 由于 $\frac{N_{\text{双}}}{n}=1$ 大于 $1-\alpha=0.95$, 则认为对于给定的显著性水平 $\alpha=0.05$, 伪寿命数据与故障数据服从同一分布, 性能退化数据与故障数据具有一致性。

3 结论

实例验证结果表明: 基于 p 值的性能退化数据与故障数据的一致性检验方法能检验性能退化数据的有效性, 保证性能可靠性模型的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] 王浩伟, 滕克难, 奚文骏. 基于随机参数逆高斯过程的加速退化建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(9): 1843-1850.
- [2] 刘震宇, 马小兵, 赵宇. 非恒定温度场合弹上性能退化型部件贮存可靠性评估[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1671-1678.
- [3] 李正映, 张桦. 装备实战化检验工作分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 16-18.
- [4] 国防科学技术工业委员会. 火工品试验方法-71℃试验法: GJB736.8-1990[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1991.
- [5] 罗湘勇, 黄小凯. 基于多机理竞争退化的导弹贮存可靠性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 701-705.
- [6] CHE H, ZENG S, GUO J, et al. Reliability modeling for dependent competing failure process with mutually dependent degradation process and shock process[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 180: 168-178.
- [7] 周源, 吕卫民, 王少蕾, 等. 基于 Copula 函数耦合性建模的二元加速退化数据统计分析方法[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 160-165.