

基于小波熵理论的多性能参数产品可靠性评估方法研究

贾占强, 梁保卫[✉], 杨建永

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 针对多性能参数复杂电子产品可靠性评估存在过程复杂、计算量大、建模困难、针对性和适用性较差的问题, 提出了基于小波熵的复杂电子产品可靠性评估方法, 将能量熵用于处理电子产品各监测时刻的信号, 将其作为随机退化量建立了多性能参数电子产品的可靠性评估模型, 给出了具体建模步骤和流程。最后以具体实例, 验证了方法的有效性。

关键词: 可靠性; 小波变换; 能量熵; 多参数; 退化型产品

中图分类号: TB114.3 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0063-05

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210618001

引用格式: 贾占强, 梁保卫, 杨建永. 基于小波熵理论的多性能参数产品可靠性评估方法研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 63-67.

Research on multi-performance parameters product reliability evaluation method based on wavelet entropy theory

JIA Zhanqiang, LIANG Baowei, YANG Jianyong

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In view of complex electronic product reliability evaluation requirement with multi-performance degradation parameters, this paper proposes the reliability evaluation method based on wavelet entropy. Energy entropy is applied to calculate monitoring data of electronic product at each monitoring time, the reliability evaluation model is found using the calculation. Based on these, the detailed modeling steps and process are given. An example of applying this method is provided to verify its effectiveness.

Key words: Reliability; Wavelet transform; Energy entropy; Multi-performance

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210618001

Citation: JIA Zhanqiang, LIANG Baowei, YANG Jianyong. Research on multi-performance parameters product reliability evaluation method based on wavelet entropy theory[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 63-67.

引 言

文献[1-5]从参数是否具有相关性方面入手, 对多性能参数退化型产品的可靠性评估方法进行了研究, 有效促进了相关理论和评估方法的研究。但在实际工程中, 研究的对象通常具有结构复杂、信号特征复杂等特点, 上述方法存在过程复杂、计算量大、建模困难、针对性和适用性较差等问题。文献[6-8]提出了基于 Copula 函数的多性能参数可靠性评估方法, 但当参数较多时, 则会遇到计算量大和模型建立难等问题。因此, 对于具有多性能参数的复杂电子产品来讲, 有必要研究一种相对简便易用的可靠性评估方法, 以促进可靠性理论的进一步工程化。

基于小波分析技术建立的小波熵理论被广泛应用于机械产品、模拟电路等机电产品的故障诊断^[9-11], 该方法的核心思想是: 产品从正常到故障状态, 其输出信号必然会发生变化, 同时其信息熵也会发生相应的变化, 通过对其输出信号信息熵的监测便可判断产品是否故障。本文借鉴这一思想, 将小波熵理论引入到复杂电子产品的可靠性评估中, 设计出了基于小波熵理论的多性能参数产品可靠性评估方法及步骤, 并以具体实例验证了方法的有效性。

[✉]通信作者: 梁保卫 (260645646@qq.com)

收稿日期: 2021-06-18 收修改稿日期: 2021-07-23

1 小波熵

在信息论中, 熵表示每个符号所提供的平均信息量和信源的平均不确定性, 它能提供关于信号潜在的动态过程的有用信息。复杂信号经过小波变换后, 映射到时间-尺度平面上, 在任意时间间隔里, 可以在多个尺度(不同分辨率)下观察信号的变化。假设每一个尺度为一个信号源, 那么, 每个尺度上的小波系数相当于一个信号源发出的信息。这样, 根据小波变换系数, 可以计算信号的小波熵。

根据小波变换的标架理论^[12], 当小波基函数是一组正交基函数时, 变换具有能量守恒的性质:

$$\sum_{j=1}^{-N} \left| \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \right|^2 = \|x\|^2 \quad (1)$$

从而可以定义小波能量为小波系数的平方和

$$E_j = \|r\|^2 = \sum_k |C_j(k)|^2 \quad (j = -1, \dots, -N) \quad (2)$$

由此可知总能量的表达式为

$$E = \|S\|^2 = \sum_j \sum_k |C_j(k)|^2 = \sum_j E_j \quad (j = -1, \dots, -N) \quad (3)$$

若将信号总能量归一化, 则各子带信号的相对能量为

$$p_j = \frac{E_j}{E} \quad (4)$$

依据 Shannon 熵理论, 小波熵^[13] (wavelet energy entropy, 记为 H_W) 即定义为

$$H_W = -\sum_j p_j \cdot \ln(p_j) \quad (5)$$

上述方法适用于随机信号的处理, 对于一个单一频率的周期信号来说, 除了包含典型信号频率的小波尺度, 所有的其它小波系数几乎都是零, 而此时信号的熵值将接近于 0 或者是一个很小的值。在这种情况下可采用如下方法求取信号的小波熵。由于在实际应用中, 信号波形都是由示波器采集得到的离散信号, 这里设采集到的信号为 $x(k)(k=1, 2, \dots, N)$, 即采样点数为 N , 则采样点的对数能量熵为

$$E_k = \ln(x^2(k)) \quad (6)$$

该信号的总能量为

$$E = \sum_{k=1}^N E_k = \sum_{k=1}^N \ln(x^2(k)) \quad (7)$$

2 基于小波能量熵的多性能参数退化数据可靠性评估算法

基于小波能量熵的多性能参数退化数据的可靠性评估算法, 主要用于解决具有多输出参数的复杂电子产品可靠性评估, 其基本步骤为:

Step 1. 假设有 n 个试验样品, 收集和采集试验样品在时间 t_1, t_2, \dots, t_m 的性能监测信号, 按照小波熵或小波对数能量熵(如式(7))的计算方法, 求出 n 个样品在各个时刻的 $H_W(t_i)$ 或 $E(t_i)$, $i=1, 2, \dots, m$;

Step 2. 失效阈值的确定, 主要通过两种方法实现: ① 在实际使用中监测到故障信号; ② 采用仿真的方法, 当组成该产品的关键单元或器件达到其失效阈值时, 仿真产生故障信号;

Step 3. 按 Step 2 的方法对故障信号进行特征提取, 得到失效阈值 H_{WDF} 或 E_{DF} ;

Step 4. 在得到受试样品各监测时刻的 $H_W(t_i)$ 或 $E(t_i)(i=1, 2, \dots, m)$ 及失效阈值 H_{WDF} 或 E_{DF} 后, 记为 $(t_i, H_W(t_i))$ 或 $(t_i, E(t_i))$ 。由于随机变量通常服从正态分布和韦布尔分布, 且韦布尔分布可适应多种分布形式(当 $m=1$ 时为指数分布, 当 $m>3$ 时可近似为正态分布), 因此, 在此基础上, 通常选择正态分布或威布尔分布建立基于退化量分布的可靠性评估模型:

① 正态分布

当 $y \leq D_f$ 时产品失效:

$$R(t) = 1 - P(y \leq D_f) = 1 - \Phi\left(\frac{D_f - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (8)$$

当 $y > D_f$ 时产品失效:

$$R(t) = 1 - P(y > D_f) = \Phi\left(\frac{D_f - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (9)$$

② 威布尔分布

当 $y \leq D_f$ 时产品失效:

$$R(t) = 1 - P(y \leq D_f) = \exp\left\{-\left[\frac{D_f}{\eta(t)}\right]^{m(t)}\right\} \quad (10)$$

当 $y > D_f$ 时产品失效:

$$R(t) = 1 - P(y > D_f) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{D_f}{\eta(t)}\right]^{m(t)}\right\} \quad (11)$$

式(8)至式(11)中, y 为各监测时刻的 $H_w(t_i)$ 或 $E(t_i)$, D_f 为失效阈值 H_{wDf} 或 E_{Df} ;

Step 5. 对各时刻退化量分布函数的参数进行估计, 估计退化量样本均值 ($t_j, \hat{\mu}_y(t_j)$) 与样本方差 ($t_j, \hat{\sigma}_y(t_j)$) 或形状参数 ($t_j, \hat{m}_y(t_j)$) 与尺度参数 ($t_j, \hat{\eta}_y(t_j)$);

Step 6. 画出分布函数参数随时间变化的轨迹, 选择恰当的曲线模型, 并对曲线方程系数进行估计;

Step 7. 给定失效阈值 D_f , 根据求得的分布参数随时间变化的函数, 利用产品可靠性与性能退化量分布参数的关系(即式(8)~式(11))对产品进行可靠性评估。

3 实例分析

线性调频信号是雷达装备中常用的信号, 线性调频信号的定义为

$$s(t) = A \cos\left(\pi \frac{\beta}{\tau} t^2\right) \quad (12)$$

其中, A 为信号幅度, β 为扫频带宽, τ 为脉宽。某型雷达接收机的线性调频信号是在展宽脉冲形成单元产生的, 它由窄脉冲电路产生的 δ 脉冲冲击声表面滤波器, 产生线性调频脉冲, 经放大与选通电路对线性调频信号进行脉冲选通, 再送到限幅放大单元, 经幅度整形和放大后, 送给上变频器; 在上变频器中将中频线性调频信号系统与本振信号系统变成二者之和的微波信号, 经功率放大, 送给发射机, 再经放大后向空间辐射出去。本文以线性调频信号形成单元为研究对象, 对其可靠性进行分析。由于涉及该型雷达的关键指标, 这里假设主要技术参数的标准值为: $A=2\text{ V}$, $\beta=3\text{ MHz}$, $\tau=20\text{ }\mu\text{s}$ 。各参数的技术要求分别为 $\beta=3\pm 0.5\text{ MHz}$, $\tau=20\pm 5\text{ }\mu\text{s}$ 。试验前初始状态的标准信号波形如图1中实线所示。

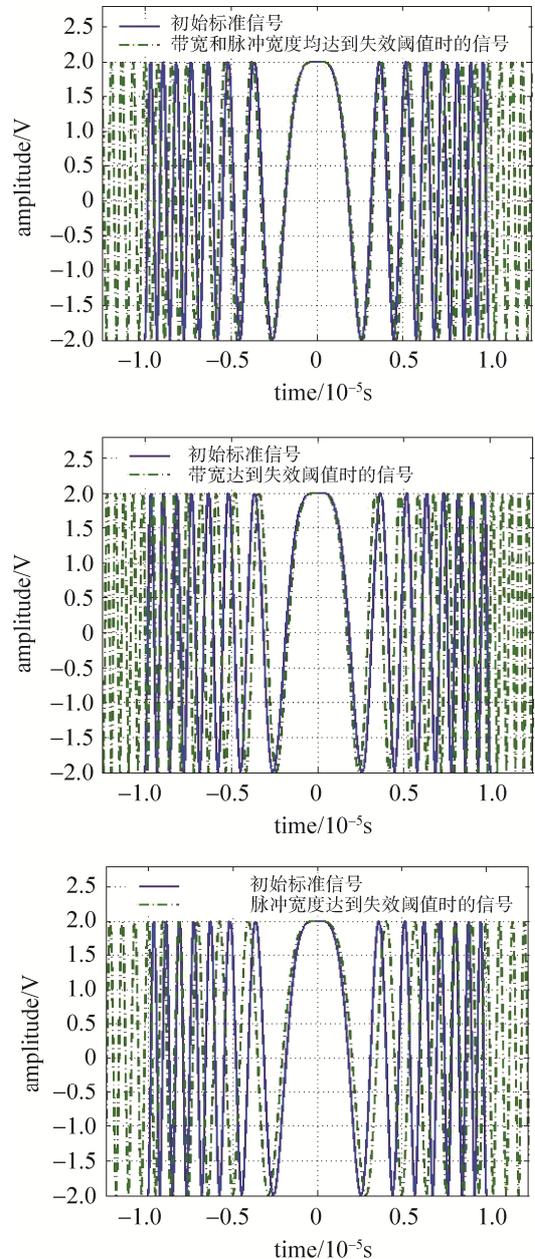


图1 线性调频信号及失效时信号
Fig. 1 Linear frequency modulation signal and failure signal

Step 1. 安排 10 个样本进行性能仿真试验, 每 100 h 测试一次数据, 到 3 000 h 停止试验;

Step 2. 按照本文方法求取各样本各监测时刻的小波能量熵, 结果如图 2 所示;

Step 3. 试验过程中, 由于 β 和 τ 呈递增趋势变化, 因此将 β 和 τ 技术要求的上限作为失效阈值, 即 $\beta=3.5$ MHz, $\tau=25$ μ s, 对应的信号波形如图 1 中点划线所示, 此时信号波形的小波熵为 0.624 9、0.868 0 和 0.617 7, 即选择小波熵最小值作为失效阈值, 即 $H_{Wdf}=0.6177$;

Step 4. 采用本文给出的可靠性评估算法来分析线性调频信号形成单元的可靠性;

① 这里假设各监测时刻的小波熵服从正态分布, 而后求取各监测时刻小波熵的均值和标准差, 散点图如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 均值和标准差都是时间的线性函数, 因此可以求出它们随时间变化的曲线方程:

$$\hat{\mu}(t) = 1.1911 \times 10^{-4} t + 0.2543 \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}(t) = 5.1370 \times 10^{-6} t + 0.0034 \quad (14)$$

② 而后将式 (13)、式 (14) 及 $H_{Wdf}=0.62177$ 代入式 (9) 得到产品在给定时间 t 的可靠度函数 (如式 (15)), 其对应的可靠度曲线如图 4 中实线所示。

$$\begin{aligned} R(t) &= \Phi\left(\frac{H_{Wdf} - \hat{\mu}(t)}{\hat{\sigma}(t)}\right) \\ &= \Phi\left(\frac{0.6177 - 1.1911 \times 10^{-4} t - 0.2543}{5.1370 \times 10^{-6} t + 0.0034}\right) \quad (15) \end{aligned}$$

Step 5. 图 4 中实线为基于小波熵方法计算得到的多变量退化产品的可靠性评估结果, 虚线为采用文献[5]中基于多元正态分布求解联合概率密度函数得到的计算结果, 两者的评估结果比较接近, 间接验证了本文方法的有效性。

4 结束语

本文从信号处理角度出发, 基于小波熵理论研究了具有复杂特性参数的多性能参数产品的可靠性评估方法, 给出了详细步骤与具体算法, 并通过具体实例对有效性进行了验证。该方法克服了现有方法计算量大、求解相关函数难、建模复杂等实际问题。复杂电子产品的可靠性评估方法研究是一个具有实际工程意义但难度极大的课题, 具体实现过程中还有诸多技术难题, 如复杂系统的竞争失效问题、小子样和极小子样条件下的系统可靠性评估方法等, 需要在今后工作中针对实际问题做进一步研究和探索。

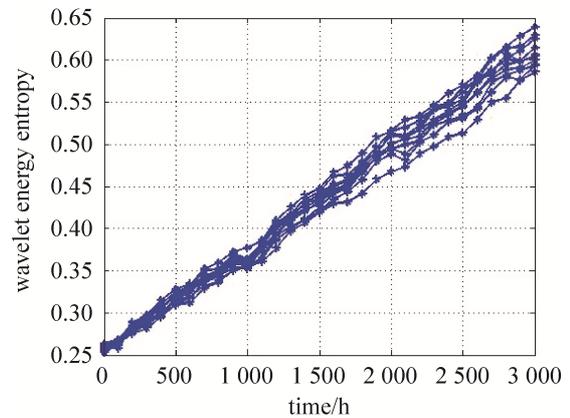


图 2 样本的小波能量熵

Fig. 2 Wavelet energy entropy of sample

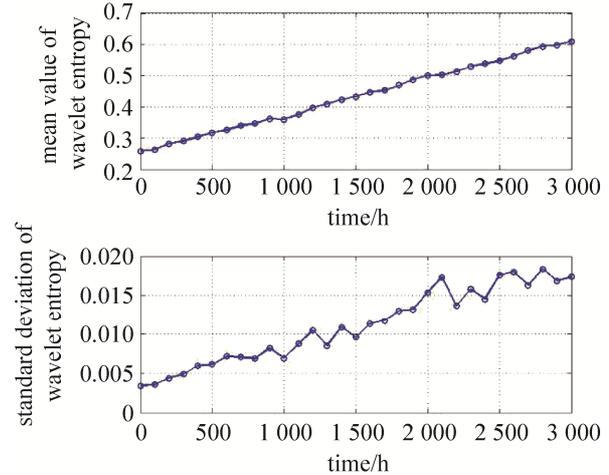


图 3 小波熵均值和标准差的散点图

Fig. 3 Mean value and standard deviation of wavelet entropy

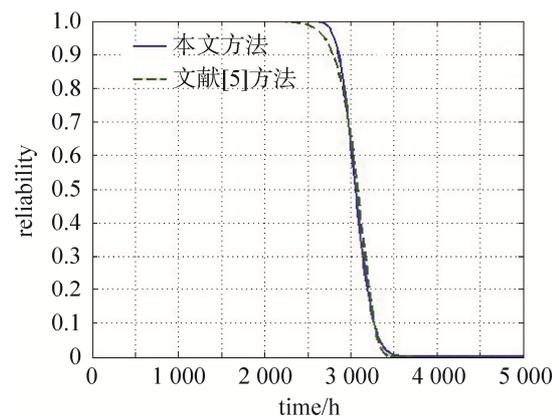


图 4 可靠度曲线

Fig. 4 Reliability curve

参考文献

- [1] XU Di, ZHAO Wenbiao. Reliability prediction using multivariate degradation data[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005: 337–341.
- [2] CRK Vladimir. Reliability assessment from degradation data[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000: 155–161.
- [3] WANG Peng, COIT David W. Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple degradation measures[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2004: 302–307.
- [4] 刘晓娟, 王华伟, 徐璇. 考虑多退化失效和突发失效之间竞争失效的可靠性评估方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(1): 7–12.
LIU Xiaojuan, WANG Huawei, XU Xuan. Reliability assessment based on competition failure considering multi-degradation and catastrophic failure [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(1): 7–12.
- [5] 胡锦涛, 胡昌华, 陈亮, 等. 基于多元退化量的可靠性评估方法研究[J]. 控制工程, 2007, 14(7): 77–79, 92.
HU Jintao, HU Changhua, CHEN Liang, et al. Study on reliability evaluation approach based on multivariate degradation measures[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(7): 77–79, 92.
- [6] 李伟, 梁玉英, 蔡金燕, 等. 基于 Copula 函数的多性能参数雷达电路板可靠性评估[J]. 仪表技术与传感器, 2014, (11): 103–107.
LI Wei, LIANG Yuying, CAI Jinyan, et al. Multiple performance parameters radar circuit board reliability assessment based on Copula function [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014, (11): 103–107.
- [7] 姜潮, 张旺, 韩旭. 基于 Copula 函数的证据理论相关性分析模型及结构可靠性计算方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 199–209.
JIANG Chao, ZHANG Wang, HAN Xu. A Copula function based evidence theory model for correlation analysis and corresponding structural reliability method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 199–209.
- [8] 贺志远, 吕卫民, 胡文林. 基于 Copula 函数的导弹部件非线性退化研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(3): 75–78, 84.
HE Zhiyuan, LYU Weimin, HU Wenlin. Research on nonlinear degeneration of missile components based on Copula function [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(3): 75–78, 84.
- [9] 陈昌孝, 何明浩, 朱元清. 基于多参数联合判决的雷达信号调制特征识别[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(2): 169–173.
CHEN Changxiao, HE Minghao, ZHU Yuanqing. A novel method for modulating recognition of radar signal with combined parameters[J] Journal of CAEIT, 2008, 3(2): 169–173.
- [10] 曾庆虎, 邱静, 刘冠军, 等. 小波相关特征尺度熵在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 国防科学技术大学学报, 2007, 29(6): 102–105, 111.
ZENG Qinghu, QIU Jing, LIU Guanjun, et al. Application of wavelet correlation feature scale entropy to fault diagnosis of roller bearings [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(6): 102–105, 111.
- [11] 蔡剑华, 黄国玉, 黎小琴. 基于频率切片小波变换时频分析的齿轮故障诊断[J]. 机械强度, 2017, 39(5): 1026–1030.
CAI Jianhua, HUANG Guoyu, LI Xiaoqin. Gear fault diagnosis based on the frequency slice wavelet transform time-frequency analysis method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(5): 1026–1030.
- [12] HE Zhengyou, CAI Yumei, QIAN Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 38–43.
- [13] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[作者简介]

- 贾占强 1982年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机测控装备通用质量特性设计与分析。
梁保卫 1980年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为无人机测控。
杨建永 1978年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机测控。