

基于距离分析的多性能参数故障预测方法

张国龙¹, 蔡金燕¹, 梁玉英¹, 吕萌¹, 卢刚²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 总装沈阳军代局驻辽阳地区军代室, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 目前, 基于性能退化数据的可靠性分析已成为有效而节约成本的可靠性评估方法, 现有关于此方面研究的文献大多局限于研究单特征量的情形, 而许多产品具有多个性能退化量。针对产品具有多个性能参数的特点, 提出了基于多参数距离分析的可靠性分析方法, 探讨并提出多性能参数距离、距离失效阈值的概念, 给出参数加权因子的求解方法。弥补了现有方法基于多元正态联合概率密度函数假设致使求解过程较复杂等不足。最后通过仿真实例验证了方法的有效性。

关键词: 故障预测; 可靠性分析; 多性能参数; 距离分析

中图分类号: V271.4; TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)02-0032-04

A Fault Prediction Approach for Multiple Performance Measures Based on Distance Analysis

ZHANG Guo-long¹, CAI Jin-yan¹, LIANG Yu-ying¹, LÜ Meng¹, LU Gang²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Military Representative Office in Liaoyang Area, Shenyang Representative Bureau, General Equipment Department, Liaoyang 111000, China)

Abstract: The reliability analysis based on performance degradation data has become an effective and economic assessment approach in nowadays. The existed researches mainly limited to one performance measure. However, many products have multiple performance measures. Therefore, we proposed a reliability analysis approach based on multivariate distance analysis, and presented the concepts of multiple performance measure distance and failure threshold of distance. A method for solving the weights was also given, which could compensated for shortcoming of complexity of the existed method based on the assumption of multivariate normal joint probability density function. Simulation examples demonstrated the validity of this approach.

Key words: fault prediction; reliability analysis; multiple performance measures; distance analysis

0 引言

相对于寿命数据, 由产品的性能退化数据能够获得更多的产品失效信息, 基于性能退化数据的可靠性分析已成为一种有效且节约成本的可靠性评估方法。目前, 国内外学者对基于退化数据的可靠性分析方法做了大量的研究, 但绝大多数基于性能退化可靠性分析研究的文献都局限于研究单特征量的情形, 且假设退化规律已知。对许多退化型产品来说, 退化规律并不是很清楚, 往往需要通过假设其退化规律来进行评估, 这就导致评估精度难以保证^[1-2]。并且, 许多退化

型产品具有多个性能退化量, 现有关于多元退化数据的研究不多。对于多元性能退化数据可靠性分析研究中, 大多数文献都是通过降维处理, 假设多元性能退化参数的联合概率密度函数服从多元正态分布, 通过预先确定的单性能退化参数的失效阈值来计算产品的可靠度^[1-2], 却忽略了多元性能退化参数相关条件下, 失效阈值可能变化的情况。本文针对多元性能退化参数相关条件, 提出多参数距离失效的概念, 通过距离分析对多性能退化参数进行降维, 而后进行可靠性分析。通过性能参数的距离分析, 且不依赖对产品退化轨迹的假设, 通过对仿真生成的数据进行处理和比较, 说明了本文方法的可行性和有效性。

1 问题描述

产品的性能变化会引起某一个或几个波形的特征

收稿日期: 2013-03-10

修回日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61271153)

作者简介: 张国龙(1987—), 男, 宁夏固原人, 博士生, 研究方向为武器系统性能检测与故障诊断。

参数发生变化,这就需要根据产品功能来考察某一些波形特征参数,然后综合考虑这些参数来评价产品工作状态或性能情况。另一种情况是,产品的性能特别是一些复杂的系统,往往要几个性能参数综合反映,同样需要综合考虑这些参数来评价产品的性能可靠性。

假设在性能退化试验中,从产品总体中随机抽取 m 个样品进行性能退化试验,分别在时刻 t_1, t_2, \dots, t_n 采集每一个样品的 l 个性能退化参数,得到 $l \times m \times n$ 个退化数据,数据结构如表 1 所示。其中, X_{ij}^v ($v=1, \dots, l, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$) 表示对第 v 个特征退化量,样品 i 的第 j 次测量得到的退化数据。利用该性能退化试验中观测到的多个性能参数退化数据进行可靠性分析,做如下假设:

- 1) 每个样品都是随机选择的;
- 2) 所有样品的所有性能退化参数的测量次数都是相同的;
- 3) 多个性能退化参数相关或者相互独立;
- 4) 产品的各个性能参数随时间呈递增(减)的退化规律。

表 1 多性能参数退化数据
Table 1 Degradation data with multiple performance measures

	样品	时间			
		t_1	t_2	\dots	t_n
性能参数 1	1	X_{11}^1	X_{12}^1	\dots	X_{1n}^1
	2	X_{21}^1	X_{22}^1	\dots	X_{2n}^1
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	m	X_{m1}^1	X_{m2}^1	\dots	X_{mn}^1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
性能参数 l	1	X_{11}^l	X_{12}^l	\dots	X_{1n}^l
	2	X_{21}^l	X_{22}^l	\dots	X_{2n}^l
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	m	X_{m1}^l	X_{m2}^l	\dots	X_{mn}^l

2 多性能退化参数可靠性分析方法

2.1 多性能参数距离分析

假设产品有 l 个性能退化参数: X^1, X^2, \dots, X^l , 且性能参数之间相关。

性能退化参数的初始值为 $X_0 = (X_0^1, X_0^2, \dots, X_0^l)$, $|X^j - X_0^j|$ 为性能退化参数与初始值的距离, 记作 $d(X^j, X_0^j)$, 两种性能参数距离的定义为

$$d_1(t) = \sum_{j=1}^l \omega_j |X^j - X_0^j|; \quad (1)$$

$$d_2(t) = \left(\sum_{j=1}^l \omega_j (X^j - X_0^j)^p \right)^{1/p}. \quad (2)$$

其中: ω_j ($j=1, 2, 3, \dots, n$) 为加权因子, 根据各个特征参数从物理上的重要性给出; p 为一个适当的常数, 一般为 2。

因为产品具有多个性能参数, 而各个性能参数之间的变化趋势单调性并不完全一致, 有的性能参数有可能随时间呈递增变化, 有的性能参数可能随时间呈递减变化, 如果按照上述公式简单叠加, 会影响性能参数距离的单调性。此时, 可对与其他性能参数单调性不一致的参数进行倒数化或其他处理, 使其与其他性能参数具有一致的单调性, 这样才能保证参数距离和的单调性和有效性。

假设 $l=2$, 即具有 2 个性能参数 X^1, X^2 , 其性能参数距离分析如图 1 所示。

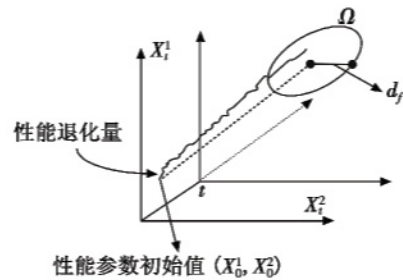


图 1 多性能退化参数距离分析

Fig. 1 Distance analysis of the multiple performance degradation measures

可以看出, 通过对多个性能参数的距离分析, 距离可以有效地反映产品性能变化的趋势, 如何确定多性能参数之间的加权因子以及距离失效阈值, 是基于多参数距离进行可靠性分析的关键所在。

2.2 加权因子 ω 的确定方法^[3]

本文以性能参数到初始性能参数的相对接近程度赋权, 但权重大小并不表示各性能参数对影响性能物理变化的重要程度, 而表示对距离和在辨别性上的重要程度, 基本步骤如下所述。

- 1) 对各个性能参数的原始数据中心化处理。

由于各个性能参数之间通常具有不同的量纲和量级, 因此不能直接进行比较。为使它们具有可比性, 需要对原始性能参数数据进行无量纲化处理。本文采用中心法对性能参数进行无量纲化处理, 它能使分析对象之间的差异体现最大, 提高性能参数的分辨效果。性能参数为 $X = \{X^j | j=1, 2, \dots, l\}$, 具体为

$$X^{*j} = \frac{X^j - \bar{X}^j}{\sigma_X} \quad (3)$$

$$\bar{X}^j = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T X^j \quad (4)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^T [X^j - \bar{X}^j]^2} \quad (5)$$

式中: X^j 为第 j 个性能参数原始数据; X^{*j} 为性能参数无量纲数据; \bar{X}^j 为 X^j 的均值; σ_X 为 X^j 的标准差。经过处理的性能参数构成矩阵 Q 。

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & \cdots & q_{nn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, $q_{ik} = X_i^{tk}$ 为无量纲后的性能数据。

2) 确定初始性能参数理想值, 即 $Q^+ = (Q_1^+, Q_2^+, \dots, Q_l^+)$, $Q^- = (Q_1^-, Q_2^-, \dots, Q_l^-)$ 。其中: $Q_j^+ = \max(q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{nj})$, $Q_j^- = \min(q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{nj})$ 。

3) 计算各个性能参数序列到初始性能参数序列的距离。采用欧式距离公式

$$G_j^+ = \sqrt{\sum_i (X_i^j - Q_j^+)^2} \quad (7)$$

$$G_j^- = \sqrt{\sum_i (X_i^j - Q_j^-)^2} \quad (8)$$

4) 计算各个性能参数到初始性能参数的相对接近度。

$$J_j = \frac{G_j^-}{G_j^+ + G_j^-} \quad (9)$$

J_j 的值越大, 表明该性能参数与初始性能参数之间的相对距离越接近, 性能参数 p 的加权因子越大。

5) 对 J_j 归一化处理, 得到各性能参数的加权因子, 即

$$\omega_j = \frac{J_j}{\sum_{j=1}^p J_j} \quad (10)$$

式中: $\sum_{j=1}^p \omega_j = 1$; $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p)$, 为加权因子向量。

2.3 距离失效阈值 d_f 的确定

失效定义为 $T(d_f) = \inf\{t; d(t) = d_f; t \geq 0\}$, 其中, d_f 为性能参数距离失效阈值。

多性能参数距离是经过加权处理的, 因此, 在给定各个性能参数失效阈值的情况下, 因各个性能参数之间的量纲不同, 不能简单地得到距离失效阈值, 假设各性能参数的失效阈值为 D_1, D_2, \dots, D_l , 则根据距离分析, 定义多参数距离失效阈值为

$$d_f = \sum_{j=1}^p \omega_j |D_j - X_j^0| \quad (11)$$

$$d_f = \left(\sum_{j=1}^p \omega_j (D_j - X_j^0)^m \right)^{1/m} \quad (12)$$

2.4 基于多性能参数距离分析的可靠性评估方法

由 2.1 节对产品性能参数距离分析后, 则根据性能参数距离的可靠度分析步骤为:

1) 根据性能参数距离定义, 求解各应力水平下, 各样本量的性能退化数据距离时间序列;

2) 采用时间序列预测方法或采用单性能参数退化轨迹分析的方法对距离进行预测分析^[4-5], 而后根据失效定义获得产品的伪失效时间;

3) 采用寿命试验的统计分析方法对其进行寿命

预测、可靠度分析。

3 仿真实例分析

为了验证本文方法的有效性, 按照文献[6]给出的方法仿真产品性能参数退化轨迹; 假定 3 个性能参数的失效阈值、初始值及退化斜率如表 2 所示, 数据产生算法详见文献[6], 这里不再赘述。

表 2 多性能参数仿真方案

Table 2 Simulation plan of the multiple performance measures

	μ_{j0}	a_j	失效阈值	协方差矩阵		
1	5	0.1	8	0.9	0.8	0.5
2	8	0.2	10	0.8	1.6	0.7
3	10	0.3	14	0.5	0.7	2.1

按照表 2 的仿真方案对产品进行仿真, 每 100 h 监测 1 次, 仿真 1000 次可获得 1000 组样品在 12 个监测时刻的性能参数退化数据, 仿真性能退化数据的均值如表 3 所示。根据仿真数据, 求得 3 个参数各时刻的距离和, 而后对其进行可靠性分析, 下面以性能参数的均值为例, 进行距离分析。

表 3 性能退化参数仿真数据

Table 3 Simulation data of the performance degradation data

X	t					
	1	2	3	4	5	6
X^1	5.13	5.17	5.25	5.45	5.57	5.58
X^2	8.19	8.37	8.54	8.88	9.02	9.12
X^3	10.26	10.51	10.84	11.2	11.57	11.79

X	t					
	7	8	9	10	11	12
X^1	5.74	5.74	5.92	6.05	6.15	6.19
X^2	9.41	9.65	9.79	10.06	10.14	10.39
X^3	12.12	12.46	12.72	12.97	13.38	13.66

1) 首先确定各参数的加权因子。根据 2.2 节的方法求得 $W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (0.3359, 0.3330, 0.3311)$ 。

2) 距离分析。选取第 2 种参数距离定义方法, 求得性能参数的距离时间序列如表 4 所示。

表 4 参数距离时间序列

Table 4 The time sequence for the distance of the multiple measures

d	t					
	1	2	3	4	5	6
d_2	0	0.1789	0.3963	0.6968	0.9288	1.0635

d	t					
	7	8	9	10	11	12
d_2	1.329	1.5754	1.751	1.9699	2.1997	2.4118

3) 距离失效阈值: 将 3 个性能参数的失效阈值 D_j 以及加权因子代入式(12), 可得到距离失效阈值 $d_f = 2.9136$ 。

4) 可靠性分析。按照上述步骤1)~3), 重复完成1000个样品性能参数的距离分析, 得到1000组距离时间序列及距离失效阈值。按照文献[4]中的方法, 采用单性能参数退化轨迹分析的方法获得各样品的伪失效时间, 而后采用寿命统计分析方法获得产品的可靠度函数, 如图2所示。

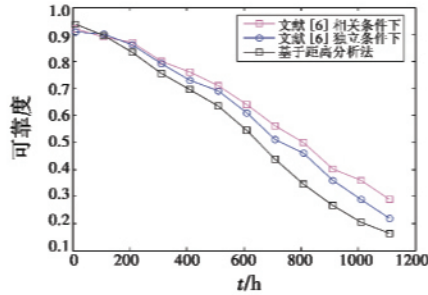


图2 基于距离分析的产品可靠度分析结果

Fig.2 Reliability analysis result based on the distance analysis

从图2中可以看出, 采用本文方法进行可靠性分析的结果与文献[6]中的方法结果接近, 说明通过多元性能参数距离能够很好地反映产品的可靠性变化趋势, 当产品的性能参数增多、监测频率及监测时间增大的时候, 基于距离分析的可靠性分析方法能大大减小计算量, 并且不用考虑性能参数之间的相关性及多元概率密度函数的假设。

4 结束语

本文提出了基于多性能参数距离分析的可靠性评估方法, 提出多元性能参数的参数距离定义, 给出各个性能参数在距离分析中加权因子的确定方法, 并首次提出多性能参数失效距离的概念, 最后结合实例验证了本文方法的有效性。本文提出的方法为多元性能参数的可靠性分析提供了新思路, 解决了现有方法基于多元正态联合概率密度函数假设, 以及求解过程较复杂等不足。然而多性能参数经过降维处理分析时, 失

效阈值应该综合考虑, 本文提出的距离失效阈值的问题有待进一步研究和完善。

参考文献

- [1] 胡锦涛. 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): 77-80.
HU J T. Study on reliability evaluation approach based on multivariate degradation measures[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(7): 77-80.
- [2] 钟强晖. 基于多元退化数据的可靠性分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3): 544-551.
ZHONG Q H. Reliability analysis approach based on multivariate degradation data[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(3): 544-551.
- [3] 舒服华. 改进灰色关联分析在铸造型砂品质评价中的应用[J]. 铸造技术, 2007, 28(1): 15-18.
SHU F H. Application of improved grey relation analysis on the evaluation of quality of molding sand[J]. Foundry Technology, 2007, 28(1): 15-18.
- [4] 邓爱民. 高可靠长寿命产品可靠性技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006: 26-50.
DENG A M. Research on reliability technology of high-reliability and long-lifetime products[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 26-50.
- [5] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005: 18-34.
ZHAO J Y. Study on reliability modeling and applications based on performance Degradation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 18-34.
- [6] PENG W. System reliability prediction based on degradation modeling considering field operating stress scenarios[D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 2003: 78-99.
- [7] 曹祥玉, 高军. 微波技术与天线[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 138-141.
CAO X Y, GAO J. Microwave technology and antenna [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2008: 138-141.
- [8] 苗强. 微波着陆系统及其场地环境缩比模型仿真研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2010.
MIAO Q. Study on the scale model simulation of MLS and Site environment[D]. Xi'an: AFEU, 2010.

(上接第21页)