2012 年 10 月 北京航空航天大学学报 October 2012
第38卷 第10期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 38 No. 10

加速度计加速退化机理模型建模方法

王前程 陈云霞 康 锐

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对传统加速退化试验方案设计缺乏机理模型支持的问题,给出一种基于主机理层试验、关键部件仿真、参数解析和系统辨识于一体的加速退化机理模型建模方法. 调研相关资料确定影响产品参数变化的主机理,通过主机理层试验得到有限元仿真输入参数,结合有限元仿真得到产品关键有限元输出参数,同时利用解析方法得到有限元输出参数和产品参数之间关系,根据系统辨识方法建立了加速退化机理模型. 以加速度计为例,建立了加速度计标度因数稳定性加速退化机理模型,将模型结果与其在常温贮存条件下结果进行对比分析,结论显示该方法的有效性.

关 键 词: 加速度计; 有限元仿真; Arrhenius 模型; 机理模型

中图分类号: V 241.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)10-1405-05

Accelerated degradation mechanism modeling method for accelerometers

Wang Qiancheng Chen Yunxia Kang Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To deal with the difficulties of lacking mechanism model for traditional accelerated degradation test design, a modeling method was proposed based on main mechanism test, key part simulation, parameters analysis and system identification. The main mechanism was identified and its test was carried out next. The key output parameters were obtained through finite element analysis. Then the relationship between key output parameters and product performance parameters was gained by parameters analysis. Finally, the accelerated degradation mechanism model was got through system identification. Taking account of the accelerometer, the accelerated degradation mechanism model and the results of scaling factor stability analysis at constant temperature were given. The conclusion of comparing the model results with historical data at constant temperature proved that the method is feasible.

Key words: accelerometer; finite element analysis simulation; Arrhenius model; mechanism model

随着科技的快速发展,高可靠长寿命产品在航空航天、船舶工业、电子技术和通讯工程等方面发挥着越来越重要的作用,传统的可靠性寿命试验已经很难准确地给出产品的性能信息,加速退化试验常用来快速激发产品的潜在缺陷,缩短试验时间. 在不改变产品失效机理的前提下,由加速退化试验获得的寿命或性能信息通过合理的外推方法可以得到产品在正常应力下的可靠性或贮存寿命估计[1-4].

工程上,一般在进行加速退化试验之前,需要开展一些先期的摸索试验,以增强加速退化试验方案设计的合理性和有效性,当然这会受到试验样件数量和试验时间的约束,在工程上有时较难以进行. 因此,为了摸清产品在各种应力下的变化规律,若能在充分考虑主机理信息基础上,建立一种相对准确的加速退化机理模型,来指导加速退化试验方案设计,在工程上将显得尤为重要. 通过对国内外相关文献调研可知,加速退化试验方案

收稿日期: 2012-01-16; **网络出版时间**: 2012-05-16 12:51

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120516.1251.011.html

作者简介: 王前程(1988-),男,江苏泗洪人,博士生,wangqc123@163.com.

设计较多没有充分考虑产品试验前的机理信息，针对上述情况，本文给出一种加速度计加速退化机理模型建模方法，为加速度计加速试验方案的合理设计提供科学依据，以保证加速试验结果的可信性.

1 加速退化机理模型建立原理

加速度计加速退化机理模型建模方法主要由以下 5 个部分组成：①参数变化主机理分析；②主机理层试验；③关键部件仿真；④参数解析；⑤系统辨识. 具体建模流程见图 1.

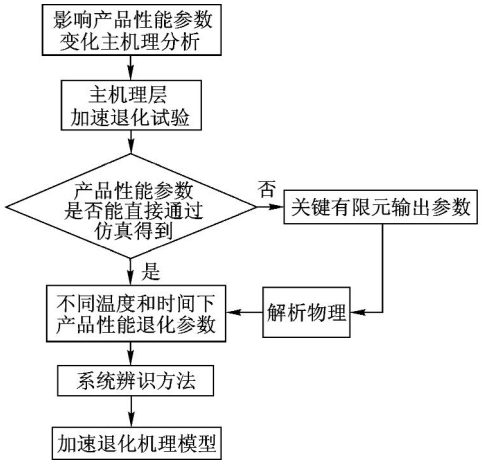

图 1 加速退化机理模型确定流程

详细建模流程如下：

1）通过调研相关资料确定影响产品参数变化的主机理以及相关材料信息.

2）对主机理进行加速退化试验得到主机理参数随温度和时间变化的离散数据.

3）根据产品复杂程度，判断产品参数能否直接通过仿真得到. 若能，则通过仿真得到不同温度和时间下的产品参数值；若不能，则利用解析物理方法得到关键有限元输出参数和产品参数之间关系，间接得到产品参数值.

4）通过对 Arrhenius 模型研究发现退化模型参数与温度存在一定关系，接着利用系统辨识方法对产品参数进行建模得到产品加速退化机理模型，结束流程.

2 退化模型参数与温度关系

常见的温度应力加速模型为 Arrhenius 模型，其具体形式如下所示[5]：

$$\partial M/\partial t = A'\mathrm{e}^{-\frac{Q}{KT}} \tag{1}$$

其中，M 为性能退化参数；t 为退化时间；$\partial M/\partial t$ 为性能参数退化速率；A' 为常数；Q 为激活能，eV；K 为玻耳兹曼常数；T 为开氏温度.

对式(1)两边同时取对数可得

$$\ln(\partial M/\partial t) = \ln A' - \frac{Q}{KT} = p + \frac{q}{T} \tag{2}$$

其中，$p=\ln A'$；$q=-\dfrac{Q}{K}$.

下面分别给出线性退化模型、指数退化模型和幂函数退化模型时模型参数与温度的表达式.

2.1 线性退化模型

设线性退化模型为 $M_{T_i}=a_i t+b_i$，由于不同温度下 $t=0$ 时初始性能退化参数值应相同，因此模型可化为 $M_{T_i}=a_i t+b$，可得 $\partial M_{T_i}/\partial t=a_i$，由式(2)得到线性退化模型参数与温度关系为

$$\ln a_i = \ln A' - \frac{Q}{KT_i} = p + \frac{q}{T_i} \tag{3}$$

其中，$p=\ln A'$；$q=-\dfrac{Q}{K}$.

2.2 指数退化模型

设指数退化模型为 $M_{T_i}=b_i\mathrm{e}^{a_i t}$，由于不同温度下 $t=0$ 时初始性能退化参数值应相同，因此模型可化为 $M_{T_i}=b\mathrm{e}^{a_i t}$，对上式两边同时取对数可得新的性能退化参数为：$M'_{T_i}=\ln M_{T_i}=\ln b_i + a_i t$，于是 $\partial M'_{T_i}/\partial t=a_i$，同样由式(2)可得指数退化模型参数与温度关系，同式(3).

2.3 幂函数退化模型

设幂函数模型为 $M_{T_i}=a_i t^b$，其中 b 为常数[6]. 对幂函数 $M_{T_i}=a_i t^b$ 进行恒等变形得下式：

$$\sqrt[b]{M_{T_i}} = \sqrt[b]{a_i}\,t \tag{4}$$

取新的性能退化参数为 $M'_{T_i}=\sqrt[b]{M_{T_i}}$，于是可得 $\partial M'_{T_i}/\partial t=\sqrt[b]{a_i}$，故有下式：

$$\ln(\partial M'_{T_i}/\partial t) = \ln\sqrt[b]{a_i} = \ln A' - \frac{Q}{KT_i} \tag{5}$$

又由于 b 为常数，则幂函数退化模型参数与温度关系为

$$\ln a_i = p + \frac{q}{T_i} \tag{6}$$

其中，$p=b\ln A'$；$q=-\dfrac{bQ}{K}$.

3 应用研究

标度因数稳定性和零偏稳定性是加速度计两个重要的性能退化参数，本文以标度因数稳定性为例，建立加速度计加速退化机理模型.

3.1 标度因数变化主机理

标度因数是指加速度计在输入轴受到单位加速度下的输出电压，其表达式为

$$K_1 = \frac{P}{K_{tg}}R_L = \frac{mL}{B_\delta l L^*}R_L \tag{7}$$

其中,P 为摆组件摆性;K_{tg}为力矩器系数;R_L 为采样电阻值;m 为摆组件质量;L 为摆组件质心到挠性平桥顶端距离;B_δ 为磁钢气隙磁感应强度;l 为力矩器线圈长度;L^* 为线圈中心距挠性平桥距离.

通过调研相关资料可知,摆组件摆性 P 随温度和时间变化均较小,可不予考虑,因此,加速度计标度因数稳定性主要由力矩器系数稳定性决定[7]. 对于经过稳定化处理(磁打击)的加速度计,力矩器系数稳定性主要取决于磁钢气隙磁感应强度稳定性,因此影响标度因数稳定性的主机理为磁钢气隙磁感应强度变化,由式(7)可得标度因数稳定性为

$$\left|\frac{\Delta K_1}{K_1}\right| \approx \left|-\frac{\Delta K_{tg}}{K_{tg}}\right| \approx \left|-\frac{\Delta B_\delta}{B_\delta}\right| = \left|\frac{B_\delta^i - B_\delta^1}{B_\delta^1}\right| \tag{8}$$

其中,B_δ^i 为同一温度下第 i 个磁钢气隙磁感应强度.

3.2　主机理层试验

由于磁钢气隙磁感应强度主要取决于磁钢相对磁导率和矫顽力,因此需要针对磁钢相对磁导率和矫顽力进行加速退化试验,其中,磁钢相对磁导率随时间和温度均有变化,而矫顽力随温度变化较大,随时间几乎不变化,相应试验结果分别见图 2 和图 3 所示.

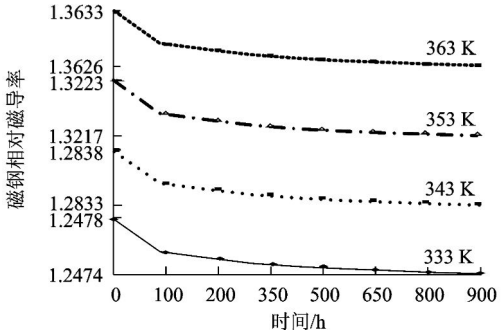

图 2　磁钢相对磁导率随温度和时间变化曲线

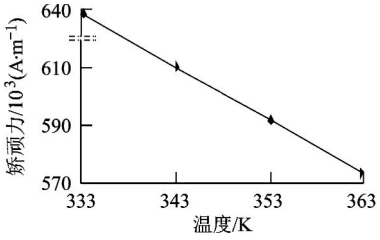

图 3　磁钢矫顽力随温度变化曲线

3.3　关键部件仿真

由于力矩器为影响标度因数变化的关键部件,因此利用 ANSYS 软件对加速度计力矩器结构进行磁场仿真,从而得到关键有限元输出参数磁钢气隙磁感应强度结果. 本节主要采用二维静态磁场法对加速度计力矩器进行磁路仿真,仿真时取力矩器的 1/4 大小建立模型.

力矩器结构由磁钢、软磁体、磁极片、补偿环、线圈和空气等组成,本节假设经过稳定化处理后的加速度计,其力矩器除磁钢外其余部件的相对磁导率不随温度和时间变化且不考虑测试时线圈通电造成的磁感应强度变化. 各建模材料输入参数如表 1 所示[8],磁钢参数见 3.2 节相关试验数据,模型划分网格时选用 PLANE13 单元,采用等级为 1 的自由网格划分方式,对有限元模型施加磁力线平行边界条件,磁力线垂直边界条件自然满足,不需施加,力矩器有限元模型见图 4 所示. 求解后通过后处理程序可以看到不同温度和时间下的磁钢气隙磁感应强度,具体结果见表 2 所示.

表 1　力矩器有限元建模材料输入参数

名称	材料	相对磁导率
软磁体	4J36	6 000
磁极片	1J50	31 847
补偿环	1J32	15 923
线圈	铜	1
空气		1

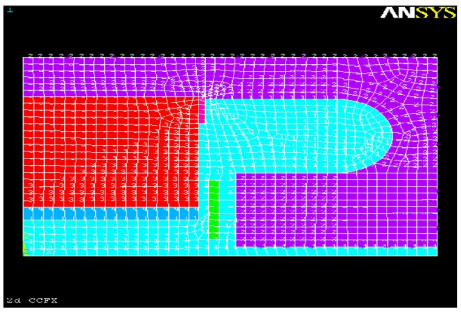

图 4　二维力矩器有限元仿真模型

表 2　磁钢气隙磁感应强度变化数据　　T

t/h	T/K			
	333	343	353	363
0	0.562 573	0.561 139	0.559 718	0.558 309
100	0.562 473	0.561 012	0.559 556	0.558 106
200	0.562 459	0.560 993	0.559 532	0.558 076
350	0.562 447	0.560 977	0.559 512	0.558 051
500	0.562 439	0.560 967	0.559 500	0.558 036
650	0.562 433	0.560 960	0.559 490	0.558 024
800	0.562 429	0.560 954	0.559 483	0.558 015
900	0.562 426	0.560 951	0.559 479	0.558 010

3.4　参数解析

利用式(8)结合表 2 可得不同温度和时间下标度因数稳定性变化数据,详细结果见表 3 所示,标度因数稳定性变化曲线见图 5 所示.

表 3 标度因数稳定性变化数据 $\times 10^{-6}$

t/h	T/K			
	333	343	353	363
0	0	0	0	0
100	177.75	226.33	289.43	363.60
200	202.64	260.19	332.31	417.33
350	223.97	288.70	368.04	462.11
500	238.19	306.52	389.48	488.98
650	248.86	318.99	407.35	510.47
800	255.97	329.69	419.85	526.59
900	261.30	335.03	427.00	535.55

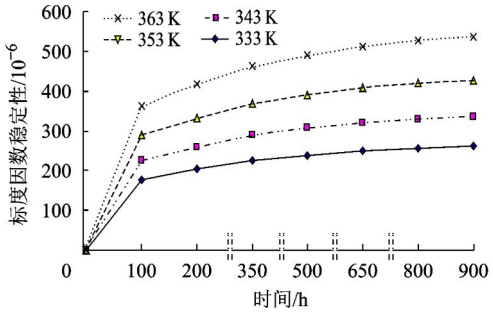

图 5 标度因数稳定性变化曲线

3.5 系统辨识

由图 5 可知,加速度计的标度因数稳定性变化速率随时间增加而逐渐减小,故可选用幂函数退化模型来描述其退化规律,即

$$\left|\frac{\Delta K_1}{K_1}\right| = at^b \tag{9}$$

式中,$\left|\frac{\Delta K_1}{K_1}\right|$ 为标度因数稳定性;t 为退化时间,h;a,b 为常数,且 $0 < b < 1$. 不同温度下加速度计标度因数稳定性初始退化模型信息见表 4 所示.

表 4 标度因数稳定性初始退化模型信息

温度/K	a	b	R^2
333	80.6603	0.1734	0.9984
343	102.1681	0.1757	0.9968
353	131.4240	0.1742	0.9973
363	165.8657	0.1733	0.9972

判定系数 R^2 表示模型拟合的优劣,$R^2 \leqslant 1$,R^2 越大,拟合的效果越好,通过表 4 可以看出,各个温度下的标度因数稳定性退化模型拟合效果均较好. 由于 b 应为常数,且 b 较接近,故不妨取 b 为 0.17,标度因数稳定性最终退化模型信息见表 5 所示.

表 5 标度因数稳定性最终退化模型信息

温度/K	a	b	R^2
333	82.3789	0.17	0.9998
343	105.7902	0.17	0.9995
353	134.8668	0.17	0.9996
363	169.2266	0.17	0.9997

由表 5 可以看出,不同温度应力下退化模型的判定系数 R^2 均比表 4 中 R^2 大,因此标度因数稳定性最终退化模型拟合效果更加显著. 根据表 5 结合式(6)可得退化模型参数与温度关系模型,关系模型信息见表 6 所示.

表 6 退化模型参数与温度关系模型信息

p	q	R^2
13.1448	−2908.9851	0.9999

通过表 6 可以看出,标度因数稳定性退化模型参数与温度关系模型拟合效果非常好,说明退化模型参数 a 与温度 T 较好地满足式(6).

综上所述,标度因数稳定性加速退化机理模型可以记为

$$\left|\frac{\Delta K_1}{K_1}\right| = \mathrm{e}^{13.1448-\frac{2908.9851}{T}}t^{0.17} = A\mathrm{e}^{-\frac{B}{T}}t^C + \varepsilon \tag{10}$$

其中,A,B,C 均为模型待估参数;ε 表示加速度计标度因数稳定性测试误差,假设其分布满足 $\varepsilon \sim N(0,\sigma_\varepsilon^2)$,根据加速度计标度因数测试误差的随机散布特性,不妨确定 $\sigma_\varepsilon = 5 \times 10^{-6}$.

由于标度因数变化主机理为磁钢气隙磁感应强度变化,加速度计样本差异性主要体现为磁钢退化规律的差异性,因此若考虑样本差异性对加速退化机理模型的影响,可以针对不同磁钢分别进行仿真分析以得到不同的标度因数稳定性加速退化机理模型,在假设参数 A,B,C 服从正态分布的基础上,对其进行统计分析,可得如下结论:

$$\left.\begin{aligned}\mu_A &= 5.113 \times 10^5\\ \sigma_A &= 2.557 \times 10^4\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

$$\left.\begin{aligned}\mu_B &= 2.909 \times 10^3\\ \sigma_B &= 29.1\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

$$\left.\begin{aligned}\mu_C &= 0.17\\ \sigma_C &= 10^{-3}\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

4 模型检验

由于加速退化机理模型常用来外推加速度计在常温贮存条件下的参数长期稳定性水平,加速退化机理模型外推水平的好坏直接影响加速退化机理模型建立的正确性. 当 $T = 298$ K 时,假设参数 A,B,C,ε 全取均值,由式(10)可得加速度计在常温贮存下标度因数稳定性变化规律为

$$\left|\frac{\Delta K_1}{K_1}\right| = 29.46t^{0.17} \tag{14}$$

由式(14)可得加速度计 2 a 常温贮存条件下标度因数稳定性变化数据,见表 7 所示.

对加速度计标度因数稳定性 2 a 贮存数据进

行统计分析可知,有 99% 的加速度计标度因数稳定性最大值不大于 150×10^{-6},且标度因数稳定性随时间单调上升,上升斜率约为 20×10^{-6}/a,通过本文方法得到的标度因数稳定性常温贮存变化规律基本满足历史贮存规律,说明本文建立的加速度计加速退化机理模型具有较好的稳健性.

表 7　常温贮存标度因数稳定性变化数据

t/d	0	1	7	30	180	365	730
标度因数稳定性/10^{-6}	0	50.57	70.39	90.15	122.25	137.87	155.11

5　结　论

1) 本文给出了一种基于主机理试验、部件仿真、参数解析和系统辨识于一体的产品加速退化机理模型建立方法,为加速退化试验方案的合理设计提供机理模型支持.

2) 本文给出一种基于 Arrhenius 模型的产品参数加速退化机理模型辨识方法,通过该辨识方法准确地得到了加速度计加速退化机理模型.

3) 本文给出了加速度计常温贮存条件下参数稳定性变化规律,为加速度计在常温贮存条件下贮存期的确定提供了方法支持.

参考文献 (References)

[1] William Q Meeker, Michael Hamada. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(2): 187 - 198

[2] Meeker W Q, Escobar L A, Lu J C. Accelerated degradation tests: modeling and analysis [J]. Technometrics, 1998, 40(2): 89 - 99

[3] Jong In Park, Suk Joo Bae. Direct prediction methods on lifetime distribution of organic light-emitting diodes from accelerated degradation tests [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(1): 74 - 90

[4] 郑德强,张正平,李海波,等. 加速退化试验技术研究、应用与发展[J]. 装备环境工程,2011,8(2):100 - 104
Zheng Deqiang, Zhang Zhengping, Li Haibo, et al. Research, application and development of accelerated degradation test technology [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 100 - 104 (in Chinese)

[5] Michal Tencer, John Seaborn Moss, Trevor Zapach. Arrhenius average temperature: the effective temperature for non-fatigue wearout and long term reliability in variable thermal conditions and climates [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004, 27(3): 602 - 607

[6] 姜仁元,张兴唐,杨亦春. 温度应力下功能退化型加速寿命试验问题研究[J]. 南京理工大学学报,2000,24(6):523 - 527
Jiang Renyuan, Zhang Xingtang, Yang Yichun. Study on accelerated life test of function degenerating type by temperature stress [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(6): 523 - 527 (in Chinese)

[7] 潘荣霖. 飞航导弹惯性器件[M]. 北京:宇航出版社,1991:390 - 391
Pan Ronglin. Inertia devices of winged missiles [M]. Beijing: Astronautics Press, 1991: 390 - 391 (in Chinese)

[8] 王春爱. 高精度加速度计的结构设计[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,2009
Wang Chun'ai. Mechanical structure design of high resolution accelerometer [D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, 2009 (in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)