

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0098- 05

机电系统故障—时间应力的关联分析技术研究*

吕克洪, 邱 静, 刘冠军

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 时间应力测量装置技术是一种测量和存储各种应力数据以及对这些数据进行挖掘与分析的技术。简要介绍了时间应力的基本概念及其研究应用的发展历程。在此基础上, 提出了基于故障模式、影响及应力分析(FMESA)的时间应力与机电系统故障的定性关联分析方法和基于多元 logistic 回归的定量关联分析方法。最后, 以某型航空地平仪为对象进行了案例研究。案例分析结果表明, 文中提出的时间应力与机电系统故障的关联分析方法能分析出影响系统性能的关键应力因素, 为机电系统的故障诊断及故障预测提供基础。

关键词: 时间应力; 故障; 关联分析; logistic 回归

中图分类号: TP277 文献标识码: A

Study on Relation Analysis Technology between Time Stress and Electromechanical System Faults

LV Ke-hong, QIU Jing, LIU Guan-jun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Time stress measurement device (TSMD) technology is a measurement and recording technology that can be used for stress history recording and data analyzing. The principle and development history of the TSMD were introduced in brief. Then, some relation analysis technologies between time stress and electromechanical system faults based on FMESA and logistic regression were studied. In order to improve the validity of our technologies, a case about the gyro was studied. The results of the case show that the relation analysis technologies between time stress and electromechanical system faults in this paper can effectively find out the electromechanical system faults induced by critical stresses, and can be applied in the fault diagnosis and prediction of electromechanical system.

Key words: time stress; fault; relation analysis; logistic regression

机电系统工作环境复杂多变, 其组件常受到机械振动、温度、湿度、辐射等环境因素的单独或复合作用, 从而导致其机内测试(built-in test, BIT)系统产生虚警, 长期的应力积累更使其机械组件产生退化和失效^[1-2]。因此, 测量和存储各种环境应力和工作应力数据, 并对这些数据进行挖掘与关联分析就显得十分必要。时间应力测量装置(time stress measurement device, TSMD)技术就是一种可以测量和记录带有时标信息的各种应力数据, 同时对应力数据进行分析的技术。时间应力与故障的关联分析技术是 TSMD 技术的核心, 其目的是找出影响系统性能的主要应力因素, 以及这些应力与故障演化之间的相互关系, 从而决定各种应力对故障的影响程度, 为故障诊断以及故障预测提供信息基础。

1 时间应力的概念及其研究应用历程

时间应力(time stress)是指机电系统在生产、运输、工作等环境中受到的各种应力的时间历程, 这些应力包括环境应力和工作应力。环境应力是指产品在贮存、运输和使用过程中可能遇到的所有外界应力(如温度、湿度、冲击、振动等)。工作应力是指其在工作过程中受到的各种影响(如开关状态、电压、压力等)。时间应力测量技术的应用历史可以追溯到 20 世纪 80 年代早期, 当时由美国 Battelle 学院研究实现了一个“应力积累指示器”, 其目的是测量并记录一个电子系统的环境应力, 这个装置成了 TSMD 的雏形^[3], 时间应力的概念也就应运而生。自 1986 年以来, 美国空军罗姆航空发展中心(RADC)就开始牵

* 收稿日期: 2006- 12- 18

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 吕克洪(1980—), 男, 博士生。

头开展 TSMD 技术的研究与开发工作^[3]; 近年来, 时间应力技术已应用于“宝石柱”航空电子结构, B+B 的分子筛氧气发生系统(MSOGS)和雷达信号处理机(RSP)和 B-52 的红外照相系统等多个装备系统上。在美国的第三代航空电子系统(如 F-16、F-22 飞机上的超高速集成电路或电子系统)中, 也采用了 TSMD 作为其机内测试(BIT)系统的重要组成部分^[2-3]。

2 时间应力与机电系统故障的定性关联分析

机电系统在设计制造阶段, 没有大量的应力与系统故障的数据资料, 而获得时间应力与机电系统故障的关联关系对于机电系统的结构设计、机内测试系统设计等都十分重要, 因此, 如何采用定性的关联分析方法来获得时间应力与故障的关联关系十分重要。针对这个问题, 本文提出了基于故障模式、影响及应力分析(failure mode, effects and stress analysis, FMESA)的故障关联分析方法, 并以直升机地平仪转子电机为具体对象进行分析研究。

2.1 基于 FMESA 的定性关联分析步骤

图 1 所示为基于 FMESA 的定性关联分析流程, 具体步骤如下:

(1) 确定组成系统的硬件及功能

首先需要确定被分析机电系统的组件及功能范围。然后按功能将其划分层次, 并确定各层次功能, 各功能的接口, 以及它们的故障定义。最后根据层次、功能、组件的划分确定各组件的名称、代码, 并确定它们的故障定义。

(2) 故障模式及影响分析(failure mode, effects analysis, FMEA)

根据系统确定的硬件组成及功能, 对其进行典型的 FMEA 分析, 以获得典型故障模式及其产生机理。

(3) 应力分析

在 FMEA 的基础上, 对系统承受的各种应力(环境应力和工作应力)进行分析, 从应力导致故障的机理分析角度确定诱发各种故障的所有应力因素, 最后通过严酷度确定导致机电系统故障的主要应力因素。

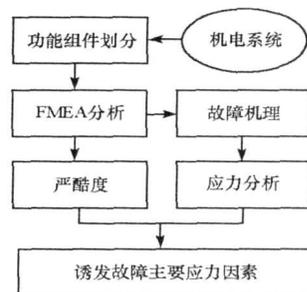


图 1 FMESA 分析流程
Fig. 1 The process of FMESA

2.2 实例分析

针对某型直升机地平仪转子电机, 通过功能分析, 将其分为六大功能组件, 即绕组、铁芯、转轴、轴承、机体和控制器。其详细的 FMESA 的结果如表 1 所示。

表 1 某型直升机地平仪转子电机的 FMESA 结果

Tab. 1 FMESA result of the gyro motor

代码	组件	故障部位	故障模式	故障原因及机理	严酷度	关联	应力				
001	绕组	绕组	匝间短路故障	绝缘损坏	I		温度				
			相间短路故障	绝缘老化	I						
			接地故障	绝缘老化	II						
			断相故障	绝缘老化	II						
002	铁芯	铁芯	硅钢片间短路	片间绝缘损坏	III			振动			
			铁心松动	紧固不良振动	III						
003	转轴	转轴	轴弯曲、断裂	安装不良、机械负荷	II				电应力		
			轴颈磨损	轴承拆装、杂物	III						
004	轴承	轴承	轴承故障	机械应力、杂物	I					冲击	
005	机体	机壳	开裂	机械应力	III						
		机座	裂纹	机械应力	III						
006	控制器	功率管	退化、击穿	热电应力	I						负荷
		焊点	开裂、脱落	机械应力	I						
											其他

从FEMASA的分析结果可以看出,对该型转子电机而言,短路故障、轴承故障和控制器故障是危害度最高的故障模式,而诱发这些故障的主要应力因素包括:温度、湿度、振动和电应力。

3 时间应力与机电系统故障的定量关联分析

在实际运行过程中,即使是相同类型的机电系统,承受的环境应力和工作应力也是不相同的。此时,为了确定某特定机电系统故障与时间应力的关联关系,通过时间应力与故障样本的收集,采用定量的关联分析算法进行分析,找出导致机电系统故障的关键应力因素对于故障的检测、预测以及降低诊断虚警,具有十分重要的意义。目前,机电系统故障可分为渐变型永久故障和间歇性故障,其中渐变型永久故障是应力损伤积累的结果,而间歇故障多是由实时应力的超标引起的,针对这个特点,下面以机电系统的间歇性故障为例,采用多元 Logistic 回归方法,建立时间应力与间歇故障的定量关联分析模型,以找出导致机电系统间歇故障的主要应力因素。

3.1 时间应力与机电系统间歇故障的多元 Logistic 回归模型及算法

基于 Logistic 分布的 Logistic 回归模型是对二分类因变量(研究对象的反应结果只取 0 和 1 两个值)进行定量分析的有力工具。该方法在医药卫生、社会科学等领域已广泛应用于解决阐明反应变量的影响因素、计算在特定条件下反应个体呈现某种状态的概率等问题^[4-5]。由于机电系统的间歇故障演化过程可以视为多因素(时间应力)诱发的二值输出(正常和间歇故障)过程,因此,本文提出采用多元 Logistic 回归的方法对时间应力和机电系统间歇故障进行关联分析。

机电系统承受的时间应力是一种随时间变化的函数,因此,可以定义时间应力向量表达式如下:

$$X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)) \quad (1)$$

其中, $X(t)$ 为时间应力向量, $x_m(t)$ 为某一种应力参数,如振动,温度等。由于系统在使用过程中受到的应力是随机变化的,因此, $x_m(t)$ 是一个随机变量。

系统状态可定义函数 $y(t)$, 其值为 0(正常状态)和 1(间歇故障状态)。由于系统状态是各种应力时间历程的函数,因此,可以定义在时间应力的作用下机电系统发生间歇故障的概率为:

$$P(y(t)=1|X) = \pi(X) = \pi(x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)) \quad (2)$$

由 Logistic 回归模型的理论^[4-6], 可以建立时间应力与机电系统间歇故障的多元 Logistic 回归模型为:

$$\pi(X) = \frac{\exp\{\beta_0 + \beta_1 x_1(t) + \beta_2 x_2(t) + \dots + \beta_m x_m(t)\}}{1 + \exp\{\beta_0 + \beta_1 x_1(t) + \beta_2 x_2(t) + \dots + \beta_m x_m(t)\}} = \frac{\exp\left\{\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i(t)\right\}}{1 + \exp\left\{\beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i(t)\right\}} \quad (3)$$

式中, β_0 表示与各种应力因素无关的常数项,在回归的数学模型中表现为回归的截距, β_i 为该回归模型的回归系数,具体表示各种应力因素 $x_m(t)$ 导致机电系统间歇故障的贡献量,即各种应力因素对该间歇故障的影响程度。

模型采用典型的最大似然度法来估计模型系数,由于 Logistic 回归模型是非线性的,因此,估计系数时需要采用迭代算法。对于本文时间应力与间歇故障的 Logistic 模型,参考文献[4-7],可定义其最大似然函数为:

$$L = \prod_{i=1}^m \pi(x_i(t))^{y_i(t)} (1 - \pi(x_i(t)))^{1 - y_i(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$y_i(t)$ 代表系统状态的观察值,对上式两边取对数可得到:

$$\ln L = \prod_{i=1}^m \{y_i(t) \ln \pi(x_i(t)) + (1 - y_i(t)) \ln(1 - \pi(x_i(t)))\}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

由最大似然度法的估计算法,为了求解能够使 L 达到最大化的回归系数 β ,需要对似然函数的回归系数求偏导,并令偏导方程等于零,从而得到 m 个方程,即:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \ln \beta_i} = 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

对这 m 个方程, 可以采用 Newton-Raphson 迭代方法得到估计值 β_0 和 $\beta_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 。

3.2 实例分析

某型直升机地平仪是一个精密仪器, 其平均无故障时间相对较短(约为数百飞行小时), 间歇故障率较高。这是由于地平仪的工作环境复杂多变, 当其处于操作状态时, 其组件常受到机械振动、温度、湿度、辐射等环境因素的影响。诸多的不利环境, 无论是单独作用还是复合作用, 都会对地平仪的正常工作产生相当大的影响。因此, 为了找出导致该型地平仪间歇故障的主要应力因素及影响程度, 本文通过应力试验对该地平仪进行了试验研究, 并获得了大量的数据。部分试验数据如图 2 所示。

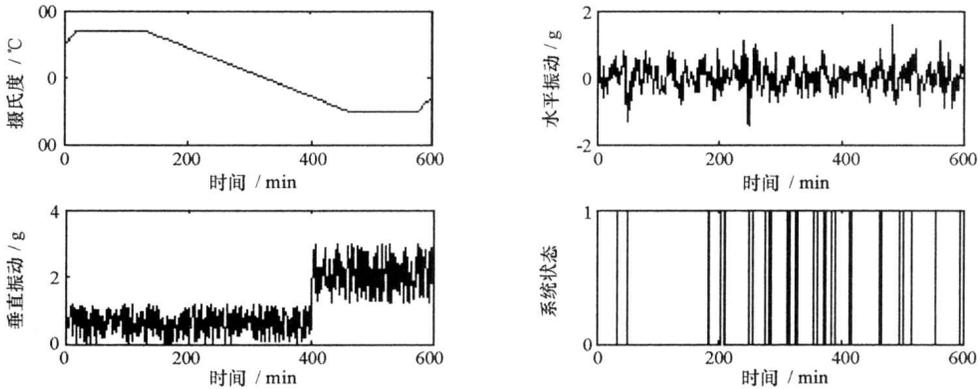


图 2 部分地平仪实验数据

Fig. 2 Data of gyro experiment

为了建立前文所述的多元 Logistic 回归模型, 特定义目标变量为系统状态, 即 $y(t)$, 其值为 0 时表示正常状态; 其值为 1 时表示间歇故障状态。解释变量定义为温度 $x_1(t)$, 水平振动 $x_2(t)$, 垂直振动 $x_3(t)$ 。对数据的回归分析计算结果如表 2 所示。

表 2 多元 Logistic 回归分析结果

Tab. 2 The result of Logistic regression analysis

应力参数	自由度	估计值	标准误差	χ^2 方值	P 值(显著性水平)
回归截距	1	2.0953	0.3981	27.6964	< .0001
温度 x_1	1	0.3147	0.00609	5.8509	0.0156
水平振动 x_2	1	-0.00398	0.00287	1.9214	0.1657
垂直振动 x_3	1	0.7947	0.3472	5.2406	0.0221

由回归结果, 可得到估计的回归方程为:

$$P(y(t) = 1 | X) = \pi(X) = \frac{\exp\{2.0953 + 0.3147x_1(t) - 0.00398x_2(t) + 0.7947x_3(t)\}}{1 + \exp\{2.0953 + 0.3147x_1(t) - 0.00398x_2(t) + 0.7947x_3(t)\}} \quad (7)$$

表 2 的分析结果表明, 影响地平仪间歇故障的主要应力因素为垂直方向的振动和地平仪的环境温度。

为了验证回归方程(7)的显著性, 表 3 是通过似然比检验、记分检验和沃尔德检验对(7)式的假设检验结果。结果表明, 经多种检验都有 $P < 0.01$, 如图 3 所示为回归分析的 ROC 曲线, 其曲线下方的面积表示本次回归的预测概率与观察结果的关联性 $c = 0.736$ 。因此, 通过 Logistic 回归得到的结果具有显著意义。

表3 假设检验结果

Tab. 3 The result of hypothesis test		
检验	χ^2 方值	P 值
似然比	8.4866	0.0037
记分检验	8.4649	0.0073
沃尔德检验	8.1428	0.0043

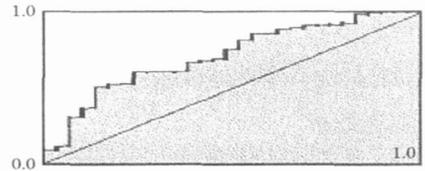


图3 回归分析的ROC曲线

Fig. 3 The ROC curve of regression

4 结论

时间应力是机电系统产生故障的主要原因,本文提出的时间应力与机电系统故障的关联分析技术能有效地分析出影响机电系统性能的主要应力因素,并决定各种应力对故障的影响程度,从而为机电系统的故障监控与诊断及故障预测提供信息基础。

参考文献:

- [1] 温熙森,徐永成,等. 智能机内测试理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:146-149.
- [2] 张宝珍. 时间应力测量装置技术(一种有发展前途的军民两用技术)[C]//2001年中国航空学会可靠性工程学术年会论文集,北京:中国航空学会, 2001:145-149.
- [3] Havy G, Louis S, Bruska S. Micro-time Stress Measurement Device Development[R]. Rome Laboratory Air Force Materiel Command Griffiss Air Force Base, New York, 1995.
- [4] Nakanichi R, Imoto S, Miyano S. Case control Study of Binary Disease Trait Considering Interactions between SNPs and Environmental Effects using Logistic Regression[J]. Proceedings of the Fourth IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering, 2004.
- [5] 洪楠,侯军. SAS统计分析系统教程新编[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:295-316.
- [6] Skomin V A, Popyack L J. Reliability of Flight Critical System Components and Their "History of Abuse" [C]//Aerospace and Electronics Conference, 1995, 1: 376-381.
- [7] 何秀丽,刘次华. Logistic回归中的加权最小二乘估计[J]. 应用数学, 2004, 17(增):144-147.

(上接第75页)

参考文献:

- [1] Philippe C. Task Scheduling over Distributed Memory Machines [M]. Parallel and Distributed Algorithms, North Holland, 1988: 165-176.
- [2] Muthucumar M, Howard J S. A Dynamic Matching and Scheduling Algorithm for Heterogeneous Computing Systems [C]//HCW'98, Orlando, USA, March 1998: 57-69.
- [3] Hyunok O, Soonhoi H. A Static Scheduling Heuristic for Heterogeneous Processors [C]//Proceedings of Europar'96, Volume 1124 of Lecture Notes in Computer Science, Lyon, France, August 1996: 573-577.
- [4] Volker S. Gaussian Elimination Is Not Optimal [J]. Numerische Mathematik, 1969, 14(3): 354-356.
- [5] Gilbert S, et al. A Compile-time Scheduling Heuristic for Interconnection Constrained Heterogeneous Processor Architectures [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A, 1993, 4(2): 175-187.
- [6] Shirazi B, et al. Analysis and Evaluation of Heuristic Methods for Static Task Scheduling [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1990, 10: 222-232.
- [7] Levchuk G M, et al. Normative Design of Organizations—Part I: Mission Planning [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics—Part A, 2002, 32(3): 346-359.
- [8] Zadeh L A. Towards a Theory of Fuzzy Information Granulation and Its Centrality in Human Reasoning and Fuzzy Logic [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997(19): 111-127.
- [9] Yang D S, Zhang W M, Liu Z. Task Allocating Among Group of Agents [C]//WI 2004, IEEE Press, Beijing, September, 2004: 574-579.
- [10] Levchuk G M, Levchuk Y N, Luo J, et al. Normative Design of Organizations—Part II: Organizational Structure [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics—Part A, 2002, 32(3): 360-375.
- [11] Levchuk, G M, Levchuk Y N, et al. Normative Design of Project-based Organizations—Part III: Modeling Congruent, Robust, and Adaptive Organizations [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics—Part A, 2004, 34(3): 337-350.
- [12] Joines J A, Culbreth C T, King R E. Manufacturing Cell Design: An Integer Programming Model Employing Genetic [J]. IIE Transactions, 1996, 28(1): 69-85.
- [13] Kazerooni M, Luong L, Abhary K. Cell Formation Using Genetic Algorithms [J]. International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing, 1995, 3: 283-299.
- [14] Gupta Y P, Kumar M C, Sundaram A. Minimizing Total Inter-cell and Intra-cell Moves in Cellular Manufacturing: A Genetic Algorithm Approach [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1995, 8(2): 92-101.
- [15] Xiu B X, Zhang W M, et al. A Novel Organizational Design Methodology Based on the Theory of Information Granulation [C]//The Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, August, 2005: 1-6.