

基于数字化样机的电子产品可靠性设计分析方法

刘柳¹, 周林¹, 邵将²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: 当前航空装备普遍采用数字化研制模式, 为引入可靠性仿真等先进技术带来了机遇。基于故障物理理论, 以电子产品的设计信息和预期工作环境作为输入, 利用建模与仿真方法对产品寿命环境下的应力特性进行分析; 结合应力损伤模型进行故障预计, 得到产品的故障信息矩阵, 从而提出了一种基于产品数字化样机的可靠性设计分析方法。针对某航空电子设备的应用验证结果表明, 利用该方法可以发现产品可靠性薄弱环节, 提出的具体预防对策可指导设计改进, 达到消除潜在故障以提高产品可靠性的目的。

关键词: 数字化样机; 故障物理; 可靠性; 应力损伤模型; 电子产品

中图分类号: TN406 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0099-05

A Digital Prototype Based Reliability Design and Analysis Method for Electronic Products

LIU Liu¹, ZHOU Lin¹, SHAO Jiang²

(1. Institute of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract: A reliability design and analysis method for electronic products was proposed based on the digital prototype. First, the common stress damage models of electronic products are analyzed. Based on the theory of physics-of-failure, and taking the design information and prospective working condition of the electronic products as the inputs, we analyzed the stress properties of the products under the life profile through computer modeling and simulation. Then failure analysis was conducted based on the stress damage model, thus the failure information matrix was obtained, and a reliability design and analysis method was proposed based on digital prototype of the product. The analysis results to an aero electronic product example show that this method can find the vulnerable spots of the reliability design, present prevention measures for improving the design and eliminating the potential faults, thus can improve the inherent reliability of the electronic product ultimately.

Key words: digital prototype; physics of failure; reliability; stress damage model; electronic product

0 引言

装备的可靠性设计和装备研制密切相关。当前, 国内的电子产品可靠性工程技术建立在故障数据统计规律性基础理论上, 即基于“可靠性数学”的途径, 强调通过故障统计规律对产品的可靠性进行总体推断。然而, 依据 GJB299 等可靠性预计手册对产品的可靠性进行分析和预计, 难以发现产品故障的根本原因, 从而

难以支持设计改进, 并且由于手册中的数据过于陈旧, 无法对可靠性进行准确分析。

随着数字化研制模式在航空装备研制工作中的推广, 数字化研制环境使得可靠性与产品性能并行设计成为可能。基于产品的数字化设计流程、可靠性设计与产品设计基于统一的数据源, 可内嵌到产品的设计流程中。因此, 欧美发达国家提出了基于产品的数字化样机, 从电子产品的故障原因和故障机理出发研究产品的可靠性问题, 由此形成了基于故障物理的可靠性技术。故障物理可靠性认为产品故障是由于环境应力与工作应力作用所致, 要对产品可靠性做出正确的设计和评价, 必须研究产品故障发生的根本原因, 充分了解产品

收稿日期: 2014-05-04

修回日期: 2014-06-24

作者简介: 刘柳(1981—), 女, 陕西榆林人, 硕士生, 研究方向为可靠性工程。

的故障模式、故障机理和故障位置等信息,进而提出各种预防措施,通过健壮设计和生产实践来预防产品故障,从而生产出具有较高“内建可靠性”的产品^[1-3]。

本文结合国内电子产品特点,提出一种基于数字化样机的可靠性设计与分析方法。首先介绍该方法的基本原理,包括故障物理理论以及常见的应力损伤模型;然后对该方法的概念、流程、特点与作用等内容进行详细介绍;最后给出了针对某航空电子设备的应用案例。

1 基本原理

1.1 故障物理理论

从故障物理的角度来讲,故障的发生并非偶然,而是存在充分的规律性,产品故障都是由机械、电、热和化学等应力作用的过程所导致的,对于故障不应仅从故障统计的角度去研究其规律性,被动地验证产品的可靠性,而应当采取更为主动的手段从材料、结构、应力、强度和损伤累积等角度,全面了解故障“何时发生”以及“为何发生”^[4-6],进而指导产品的可靠性设计。

1.2 电子产品的应力损伤模型

电子产品的故障可以追溯到不同应力导致的故障机理。对任何产品潜在的故障类型,均应分析其原因,从而可以用工程手段消除或者延迟相应故障的发生。产品故障可以描述为特定的设计参数和载荷条件的函数,称为应力损伤模型。通用的电子产品应力损伤模型可表述为

$$T_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中: T_i 为特定故障机理下的故障时间; $f(x)$ 为某种数学函数; x_1, x_2, \dots, x_n ,为故障的影响因素,包括产品设计参数(材料、结构和功耗等),载荷参数(环境载荷和工作载荷)等。

电子产品在寿命周期环境中最常见的载荷类型为热和振动,据统计,电子产品所发生的故障中有60%左右是由于这两种环境载荷所致,互连热疲劳应力损伤模型和互连振动疲劳应力损伤模型是目前国际上研究和应用最多的两种应力损伤模型。

1.2.1 互连热疲劳应力损伤模型

在温度循环作用下,最常见的故障机理是疲劳失效。由于电子产品互连周边各材料的热膨胀系数不同,从而导致在热膨胀或收缩时,各材料产生的热应变不匹配,并在应变不协调处产生应力集中,导致裂纹萌生和扩展。

文献[7]考虑了热循环加载过程中循环频率和平均温度对焊点疲劳寿命的影响,提出了疲劳模型,即

$$N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma_r}{2\varepsilon_f} \right)^{1/c} \quad (2)$$

式中: N_f 为疲劳寿命; ε_f 为疲劳延性系数; $\Delta\gamma_r$ 为总的剪切应变幅; c 为温度和频率的函数,可表示为

$$c = -0.442 - 6.0 \times 10^{-4} T_s + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1+f) \quad (3)$$

式中: T_s 为热循环的平均温度; f 为热循环频率。

1.2.2 互连振动疲劳应力损伤模型

电子设备在实际工作条件下常受到外界因素引起的振动影响,而设备内部的电路板也会随整机设备振动而振动。振动产生的不稳定应力会使板上的元器件出现焊点可靠性、镀通孔可靠性以及电路板本身的疲劳问题。

文献[8]提出的随机振动疲劳模型为

$$N_f = N_0 \left[\frac{z_0}{z_f \sin(\pi x) \sin(\pi y)} \right]^b \quad (4)$$

式中: N_f 为器件的疲劳寿命; x 和 y 为该器件在电路板上的位置坐标; N_0 为根据标准试验确定的常数,对于随机振动, $N_0 = 2 \times 10^7$; $b = 6.4$,为疲劳强度指数; z_0 和 z_f 由下式确定

$$\begin{cases} z_0 = \frac{0.00022B}{ct\sqrt{L}} \\ z_f = \frac{36.84\sqrt{P_{\max}}}{f_n^{1.25}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{\max} 为随机振动的最大功率谱密度; f_n 为随机振动的最小自然频率; B 为器件到电路板的距离最大值; L 为器件长度; t 为电路板厚度; c 为系数。

2 基于数字化样机的可靠性设计分析方法

2.1 概念

基于数字化样机的可靠性设计分析方法是指采用建模与仿真手段建立产品的数字化样机,在此基础上基于故障物理理论对产品可靠性进行分析,发现产品的可靠性薄弱环节,以指导设计改进,进而提高产品的可靠性水平。

2.2 流程

基于数字化样机的可靠性设计分析主要包括数字样机建模、应力分析和故障预计3个内容,基本流程如图1所示。具体包括以下3个步骤:

1) 建立描述产品结构、热、振动特性的数字样机,包括计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)数字样机、计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数字样机和有限元方法(Finite Element Method, FEM)数字样机;

2) 利用热应力分析、振动应力分析方法获得潜在故障点所承受的应力水平;

3) 将上述分析结果和各潜在故障点的结构材料参数输入故障机理对应的应力损伤模型,进行故障预计,即可得到电子产品经受一定环境条件作用的故障

信息矩阵,包括产品潜在的故障位置、故障模式、故障机理及故障时间。

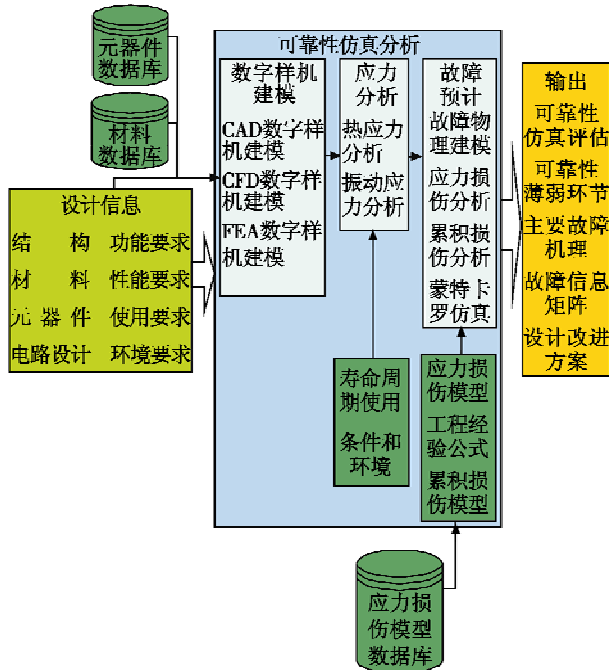


图1 基于数字化样机的可靠性设计分析流程

Fig.1 Process of reliability design and analysis based on digital prototype

2.3 特点

1) 与产品的具体设计特性密切结合。

产品的设计特性,尤其是产品的结构、材料和几何特性对可靠性的影响非常大。例如,电子元器件采用不同的封装材料,具有不同的几何外形,对特定的应力响应将是完全不一样的,其可靠性水平也必然不同。

2) 完整地考虑了产品预期寿命周期环境及工作载荷历程的影响方式。

环境和工作载荷是导致产品故障的外因。首先,产品的故障不但与稳定的载荷有关,而且变化的载荷历程如循环温度、循环湿度、动力循环、电压偏差、振动、灰尘、辐射和化学变化的过程等,对电子产品可靠性的影响都非常大;其次,必须区分产品外部载荷和局部载荷的不同,有时较大的外部载荷并不意味着产品特定位置必然承受较大的载荷水平,必须全面考虑载荷历程在产品各处的影响情况。

3) 对产品故障进行详细定义。

根据具体的故障机理、故障模式、故障位置和相应的电功能参数值等信息来定义产品故障。由于产品的故障可能包含多种故障模式,必须既能对各种故障模式的故障时间进行评估,保证评估结果的完整性;同时又能根据一定的标准确定关键的故障模式和故障机理。这样的可靠性分析方法比单纯依靠对产品故障数

据的统计分析方法效率更高也更具体,为设计提供明晰的输入。

4) 考虑了制造过程的影响。

工艺制造过程的波动必然对产品可靠性造成影响。例如,在某型集成电路的封装过程中,由于集成电路上的压合点和焊盘上的压合点没有对齐而严重影响了产品的可靠性;另外,不同制造商的产品质量与可靠性水平也不尽相同。因此,在评估产品的可靠性时一定要了解产品制造过程的质量保证情况。

5) 考虑了随机因素(离散性)的影响。

设计、制造和使用过程中存在各种随机因素是导致可靠性离散性的根源。建立起输入源头波动和可靠性指标波动之间的关系,有利于合理地估计可靠性指标的波动规律,也提供了减小可靠性波动性的可能途径,比如基于参数的敏感性分析可为提高可靠性水平、提高稳健性提供依据。

2.4 作用

- 1) 进行可靠性预计,比较不同设计方案的优劣;
- 2) 分析潜在的故障机理和原因,确定设计薄弱环节;
- 3) 指导和辅助可靠性设计优化,评估优化效果;
- 4) 进行可靠性仿真分析,和物理试验相比节约研制时间和成本;
- 5) 为可靠性试验和可靠性评价提供输入。

3 某航空电子设备的可靠性设计分析

3.1 数字样机建立

选取某航空电子任务管理处理机(MMP)设备进行可靠性设计分析。分别利用CATIA、FLOTHERM以及HYPERMESH软件来建立MMP设备的CAD、CFD、FEA数字样机,如图2所示。CFD数字样机是采用计算流体力学方法建立的描述产品热特性的数值模型,FEA数字样机是采用有限元方法建立的描述产品振动力学特性的数值模型,CFD与FEA数字样机分别是进行热应力分析和振动应力分析的前提。

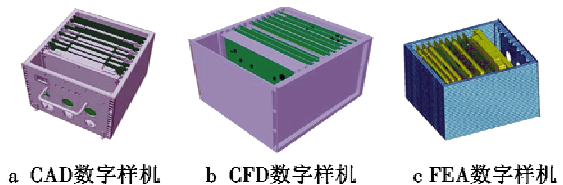


图2 MMP的数字样机示意图

Fig.2 Digital prototypes of MMP

3.2 应力分析

3.2.1 热应力分析

热应力分析是为了对产品进行耐热设计,可以得到产品高温部位以及产品的热应力分布情况,并可为产品故障预计提供输入。基于FLOTHERM软件对产品CFD数字样机进行热应力分析,PSM模块温度分布

结果见图3。

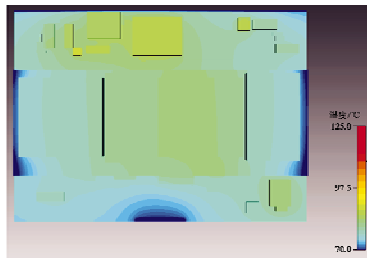


图3 PSM 模块温度分布结果示例图

Fig. 3 Temperature distribution graph of PSM module

表1所示为PSM模块中主要功率器件的热分析结果。

表1 PSM 模块功率器件温度

Table 1 Temperatures of power device of PSM

| 模块 | 位号 | 型号 | 功耗/W | 最高允许温度/°C | 稳态工作温度/°C |
|-----|----|--------------|-------|-----------|-----------|
| PSM | A1 | ZHHU44120_A | 1.75 | 125 | 87.7 |
| | A2 | MCH2812S_ES | 0.7 | 135 | 85.5 |
| | A3 | MGDS150HC_T | 10.5 | 125 | 82.7 |
| | A4 | MTR2812DF_ES | 2.45 | 125 | 81.3 |
| | A5 | MGDS150HB_T | 10.5 | 125 | 79.6 |
| | D1 | LM139J | 0.175 | 125 | 80.2 |
| | D2 | CD4013BF | 0.175 | 125 | 80.6 |
| | D3 | 5407J | 0.175 | 125 | 82.4 |

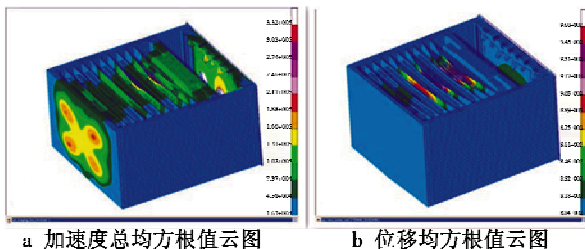
3.2.2 振动应力分析

振动应力分析是为对产品进行抗振设计,可得到产品振动环境中的应力水平过大部分和抗振设计的缺陷部位,并得到产品在振动环境中的应力分布情况,可为产品故障预计提供输入。基于MSC.NASTRAN软件对产品FEA数字样机进行振动应力分析,表2给出设备模态分析结果,MMP设备的振动响应分析结果见图4。

表2 MMP设备前6阶谐振频率

Table 2 First 6 resonance frequencies of MMP

| 固有频率/Hz | 阶次 | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | 212.8 | 213.7 | 214.8 | 215.0 | 219.1 | 240.8 |



a 加速度总均方根值云图 b 位移总均方根值云图

图4 振动响应分析结果

Fig. 4 Vibration response analysis result

3.3 故障预计

故障预计是指基于故障物理原理,通过建模与仿真手段对产品的可靠性进行设计和分析。以热应力分析和振动应力分析的结果作为输入,结合产品的应力

损伤模型,采用可靠性分析软件CALCE PWA对产品进行故障预计,最终得到产品的故障信息矩阵,包括故障位置、故障模式、模式机理、故障时间等信息。所建立的故障物理分析模型和故障预计结果分别如图5、图6所示,图6中深色为故障器件。

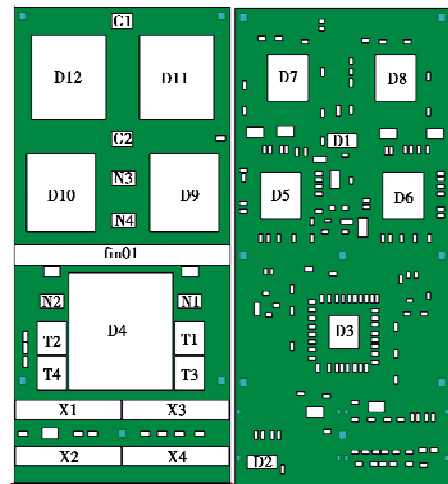
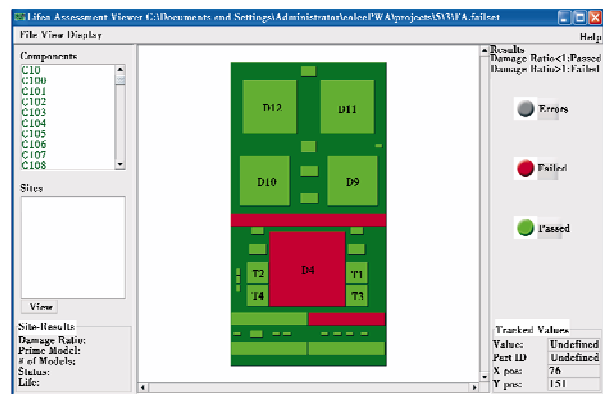
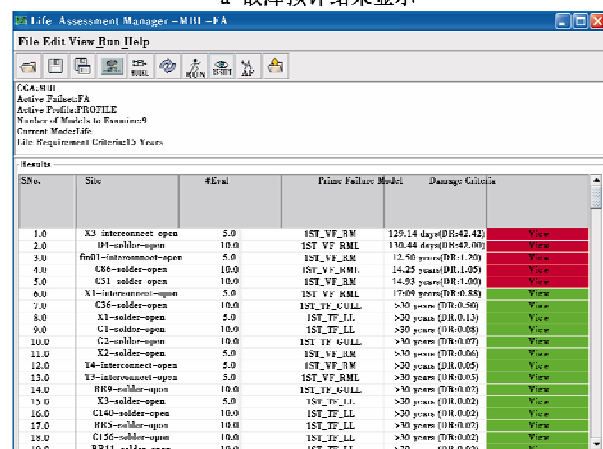


图5 某模块的故障物理分析模型

Fig. 5 Physics-of-failure analysis model of a module



a 故障预计结果显示



b 故障信息矩阵列表

图6 某模块的故障预计分析结果

Fig. 6 Failure prediction analysis results of a module

表3列举故障预计得到的部分器件故障信息矩阵。

表3 故障预计得到的部分器件故障信息矩阵
Table 3 Part of failure information matrix in failure prediction analysis

| 模块 | 器件 | 故障模式 | 故障机理 | 预计故障时间/h |
|-----|----|------|------|----------|
| PSM | Y3 | 焊点开裂 | 热疲劳 | 3433 |
| | Y1 | 焊点开裂 | 热疲劳 | 3533 |
| | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

3.4 设计改进与第二轮可靠性设计分析

针对第一轮可靠性设计分析指出的 MMP 可靠性薄弱环节,同设计人员交流后对产品进行设计改进,改进方案为更换部分器件、加大冷板以及调整部分器件的位置。针对改进的 MMP 设备,根据图 1 所示的可靠性设计分析流程进行改进后产品的可靠性仿真及对比分析。

3.4.1 热应力分析结果对比

根据第一轮仿真结果,设备设计改进的方案为增加冷板及调整部分模块位置。图 7a 和图 7b 分别为 PSM 模块在产品的设计前后热分析结果的对比图,可以发现,改进后 PSM 模块大部分原高温器件的温度明显降低。

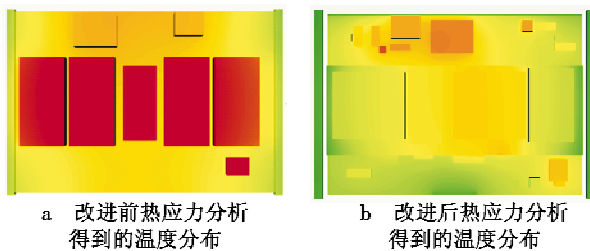


图7 PSM 模块的热应力分析结果对比

Fig.7 Comparison of thermal analysis results of PSM module

3.4.2 振动应力分析结果对比

根据第一轮仿真结果,设备设计改进的方案为对电路板上边界进行加固处理。图 8a、图 8b 分别为 PSM 模块在产品的设计前后振动应力分析结果的对比图,可以发现,改进后 PSM 模块整体的应力水平也明显下降。

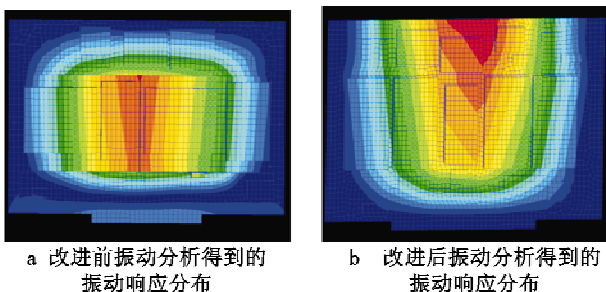


图8 PSM 模块的振动分析结果对比

Fig.8 Comparison of vibration analysis results of PSM module

4 结束语

基于模型的系统工程设计理念目前在国内航空装备研制中正在推广,在数字化研制模式下,基于数字化

样机开展产品可靠性设计分析是未来装备可靠性工程技术的发展趋势之一。

本文提出的基于产品数字化样机的可靠性设计分析方法基于故障物理学,从产品的设计与环境条件出发,利用应力损伤模型开展产品可靠性的分析与设计。与传统的基于数理统计的可靠性设计分析方法相比,该技术与产品设计紧密结合,利用故障机理分析直指电子产品故障的本质,发现产品的可靠性设计问题,提出具体预防对策指导设计改进,从而达到消除潜在故障以提高可靠性的目的。

参考文献

- [1] SNOOK I, MARSHALL J M, NEWMAN R M. Physics of failure as an integrated part of design for reliability [J]. The Journal of the Safety and Reliability Society, 2003, 27(1): 29-48.
- [2] PECHT M, DASGUPTA A, BARKER D, et al. The reliability physics approach to failure prediction modeling [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 6(4): 267-273.
- [3] LI Y H, WANG H, XU M. Virtual qualification of the aircraft computer based on physics-of-failure reliability assessment approach [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Quality and Reliability, 2005: 765-772.
- [4] OSTERMAN M, STADTERMAN T. Failure assessment software for circuit card assemblies [C]//Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Washington D. C, 1999: 269-276.
- [5] PECHT M, GU J. Physics-of-failure based prognostics for electronic products [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(3/4): 309-322.
- [6] 张蕊,汪凯蔚,沈嵘嵘.高可靠电子设备可靠性仿真试验技术应用研究[J].电子产品可靠性与环境试验, 2012, 30(6): 13-19.
ZHANG R, WANG K W, SHEN Z R. Research on reliability simulation test technology application of high reliability electronic equipment [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2012, 30(16): 13-19.
- [7] ENGELMAIER W. Fatigue life of leadless chip carriers solder joints during power cycling [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1983, 6(3): 232-237.
- [8] STEINBERG D S. Cooling techniques for electronic equipment [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.