

基于故障物理的电子产品可靠性仿真分析方法

陈颖 高蕾 康锐

(北京航空航天大学,可靠性与系统工程学院 可靠性与环境工程技术重点实验室,北京 100191)

摘要: 基于故障物理的电子产品可靠性仿真分析方法首先对产品进行故障模式、机理与影响分析(FMMEA),得到所有潜在故障点的故障模式、机理与对应的物理模型。利用产品材料、结构、工艺、应力等参数建立产品的仿真数字模型,并进行应力分析,利用概率故障物理(PPoF)模型进行损伤分析,得到各潜在故障的寿命分布。最后利用时间竞争的原理对其进行数据融合,得到产品故障率、平均故障间隔时间(MTBF)等可靠性指标。通过某型单板计算机的可靠性仿真过程说明了该方法的实施流程。这种基于故障物理的可靠性仿真的方法从微观角度将可靠性与产品的结构、材料及所承受的应力联系在一起,有助于发现产品的薄弱环节并采取切实有效的措施,是目前基于手册数据的可靠性预计方法的有益补充。

关键词: 故障物理; 可靠性仿真; FMMEA; 损伤分析; 概率故障物理

中图分类号: TP391.9; TP202+.1 文献标识码: A 文章编号: 1673-5692(2013)05-444-05

Research on Reliability Simulation Prediction of Electronic Product Based on Physics of Failure Method

CHEN Ying, GAO Lei, KANG Rui

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

Abstract: In PoF based reliability prediction method, FMMEA is firstly introduced to get the failure mode, mechanism and failure physics models. Performance parameters such as material, structure, technology and stress are used to found the simulation model. Some data are acquired by stress analysis and then PPoF models are used to carry out damage analysis, from which a great amount of TTF samples under single point and single failure mechanism are achieved. Reliability parameters like failure rate and MTBF can be computed through fusing of TTF data. Reliability prediction of a single board computer is given as an example of the failure simulation method. This method links reliability with structure, material and stress of a product, which will assist finding the weakest point of a product and adopting effective measures. This method is a supplement to statistics data based reliability prediction method.

Key words: Physics of failure; reliability prediction; FMMEA; damage analysis; Probabilistic-PoF

0 引言

目前国内常用的电子产品可靠性预计方法通常是借助各种手册,例如国军标 GJB/Z299C-2006,美军标 MIL-HDBK-217f,以及商用Telcordia SR-332等标准进行

的。在产品的故障机理认识不清,且无故障物理模型可用时,基于手册的预计方法从宏观角度给出元器件和产品的可靠性指标,为可靠性分配等工作提供基础。

故障物理(PoF, physics-of-failure)方法通过分析产品的故障模式,了解故障变化的本质,研究故障产生的机理,建立材料、结构等性能参数与环境应力之

收稿日期: 2013-07-01 修订日期: 2013-07-19

基金项目: 国家重点基础研究(973)项目

间的关系模型,从而揭示故障发生和发展的过程。与基于手册的预计方法不同,故障物理是对故障微观层面的认识,对产品设计的改进有直接的指导意义。故障物理的研究始于 20 世纪 60 年代,之后不断的指导着产品的设计改进,同时各国学者也建立了包括电迁移、热载流子、腐蚀、焊点热疲劳在内的多种电子产品故障物理模型^[1]。20 世纪 90 年代,美国马里兰大学 CALCE 中心深入研究了基于故障物理的电子产品辅助设计与分析方法^[2],并应用在汽车、飞机等各类电子控制系统的可靠性设计中。马里兰大学 McLeish^[3]从 MIL-HDBK-217 的修订小组的角度讨论了如何将故障物理的方法与 MIL-HDBK-217 相结合。以上的研究说明,故障物理的方法已经逐渐走向了工程应用。

1 总体思路

基于故障物理的可靠性仿真方法的总体思路框图,如图 1 所示。

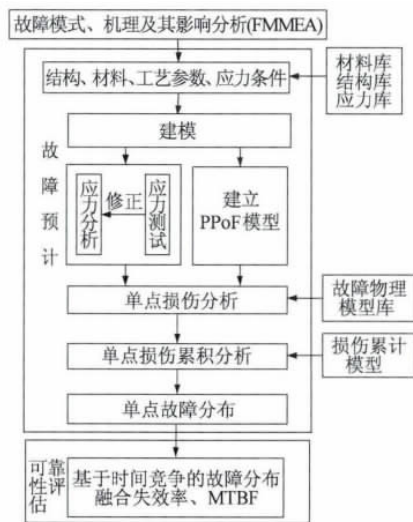


图 1 总体思路

首先通过故障模式、机理与影响分析(FMMEA, failure mode, mechanism and effect analysis),得到产品可能故障点的故障机理及物理模型。利用产品的结构、材料、工艺参数和环境应力等参数,建立电子产品的数字模型,在此基础上利用计算机仿真得到各故障点所承受的应力,结合故障物理模型及概率化的方法,可以得到各个故障点故障时间的分布。通过数据融合,最终得到产品的可靠性参数,如故障率、MTBF。

2 FMMEA 分析

FMMEA^[4,5]与传统的 FMEA 相比,增加了对故障机理的剖析及确定故障物理模型及参数,其基本实施步骤,如图 2 所示。

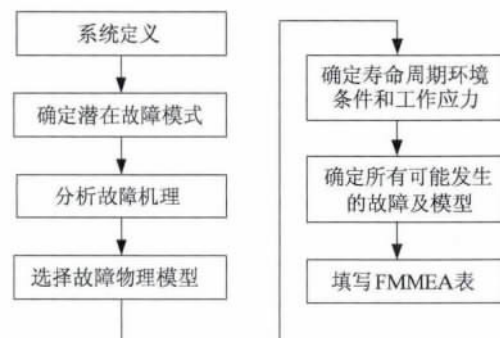


图 2 FMMEA 的实施步骤

将电子产品上所有的元器件、零部件和互连等看成是潜在故障点,分析这些潜在故障点可能存在的故障模式、故障机理,而后根据产品寿命周期的环境条件和工作应力,确定可能发生的故障,并收集物理模型中的材料、结构、工艺等参数。部分元器件(部件)典型失效模式、机理与物理模型见表 1,这些也是 FMMEA 表的主要组成部分。

表 1 部分元器件(部件)典型失效模式、机理与故障物理模型

潜在故障位置	故障模式	故障机理	环境与工作应力	故障物理模型
半导体器件	开路、短路、高阻、漏电	电迁移(EM)	相对湿度、电压、温度	Black 模型 ^[6]
	阈值电压增大 开关电阻增大	栅氧化层经时击穿(TDDB)	电过应力、温度、 沟道大电场	Wu 模型 ^[7]
	短路	热载流子效应(HCI)		HCI 模型 ^[8]
	栅电流(增大阈值电压漂移)	负偏压温度不稳定性效应(NBTI)	高温、强场、负栅压	NBTI 模型 ^[8]
	开路	芯片腐蚀	湿度、过电应力	Pecht 模型 ^[9]
	开路、烧毁	芯片粘结界疲劳	温度循环	Suhir 模型 ^[10]
电容	击穿、烧毁	介质击穿	电过应力、温度	Rawal 模型 ^[11]
焊点	信号断续、开路	热疲劳	温度循环	Coffin-Mason 模型 ^[12]
通孔、过孔	信号断续、开路	热疲劳	温度循环	CALCE 模型 ^[13]

3 故障预计

故障预计是利用故障物理模型和仿真分析的方法,对电子产品单点故障的故障前时间(TTF, time to failure)进行计算的方法。

3.1 应力分析

首先建立电子产品的数字模型,利用转化的有限元等模型进行应力分析。应力分析包括热、振动和电应力分析。振动应力分析可利用有限元软件 ANSYS、MSC. Nastran 实现,热应力分析可利用 Ice-pack、Flotherm 实现。电应力分析可通过 Protel、Cadence 等实现。为了保证应力分析的准确性,还要对产品进行应力测试,根据测试结果对应力分析的结果进行修正。

3.2 单点故障的损伤分析

设备的单点故障是指会引起系统故障,而且没有冗余或替代的操作程序补救的故障。单点故障的损伤分析是利用故障物理模型求解故障前时间的过程。损伤分析需要三种输入:一是故障物理模型,二是各潜在故障点的局部应力,三是故障物理模型中的相关特性参数。故障物理模型通过 FMMEA 分析得到。潜在故障点的局部应力由应力分析或应力测试得到。故障点的材料、结构、工艺等参数由产品相应的材料、元器件、部件说明资料或手册获得。

由于电子产品在寿命周期环境下的载荷历程比较复杂,一般在分析中会转换成多种应力水平的载荷形式,因此需要在每一应力水平下分别进行损伤分析,如热应力损伤分析、振动应力损伤分析和电应力损伤分析等。

3.3 损伤累积分析

损伤累积是对多种应力造成的损伤进行叠加。分析中假设每一应力水平对电子产品的损伤量只与最终损伤量值的大小有关,而与应力本身无关,仅考虑损伤量的叠加过程。损伤累积模型种类很多,例如线性累积模型、双线性累积模型和非线性累积模型等。常用的是 Miner 线性累积模型,该模型假定材料在各个应力水平下的损伤是独立进行的,总损伤可以线性叠加,即

$$D = \sum_{i=1}^l n_i/N_i = 1 \quad (1)$$

式中 l 为主幅载荷的应力水平级数; n_i 为第 i 级数值的循环次数; N_i 为第 i 级载荷的寿命; D_f 为损伤

和。当损伤 D 达到临界值 D_f 时就发生破坏。损伤累积分析后可以得到多应力下单点故障前时间。

3.4 概率故障物理模型

故障物理模型所计算的 TTF 是确定性的。为了考虑参数随机因素的影响,利用概率化的方法,对电子产品的结构、材料、工艺、应力条件等数据进行分散化,建立概率故障物理(Probabilistic-PoF)模型。概率化的方法可以是解析推导的方法,也可以是用仿真的方法。前者有较强的理论依据,得到的模型形式固定。后者对故障分布不敏感,具有较强的工程适用性。利用 PPF 模型,可以得到某一故障机理下大样本量故障前时间数据。

4 可靠性评估

可靠性评估是利用蒙特卡洛仿真对各单点故障密度分布函数进行基于时间竞争原理的融合,每次仿真中取寿命最短的单点故障为电子产品的故障时间,最终得到产品的故障密度分布函数,从而得到产品的故障率、平均故障间隔时间 MTBF 等可靠性参数。

5 案例分析

某型单板计算机,如图 3 所示,主要用于地面自动控制系统中。

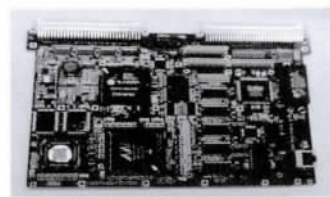


图 3 某型单板计算机

该设备所处的温湿度环境条件良好。地面最高温度为 50°C ,电路板周围每天最高和最低气温为 27°C 和 16°C ,相对湿度在 $50\% \sim 80\%$ 之间。周围无强磁场或辐射、无随机振动和冲击环境。工作应力中没有大电流、高电压。

单板机上有 CPU 微处理器,内存与缓存、传感器芯片、计数器及各种接口,其功能相当于一台微型电脑。元器件类型包括:集成电路、贴片电容、钽电容、金属膜电阻、电感、连接器、晶振、开关和 PCB (包括焊点、焊盘、PTH、过孔、金属互连线)。PCB 材料为 FR-4,金属化连线和镀通孔(PTH)材料为铜,焊料为 $63\text{Sn}37\text{Pb}$ 。PCB 通过四边上的安装孔固定,

安装部位不考虑故障问题。

在这些条件下对该单板机进行可靠性仿真分析。首先进行FMMEA分析,列出单板机上所有潜在故障模式和机理,由于周围环境条件良好,排除了一些过应力故障,如随机振动、冲击断裂、静电放电和过电应力等。电路板上的IC芯片全部是国外大型厂商提供,到国内进行组装。所有IC芯片的故障机理,如电迁移、TDDDB等发生的可能性远远小于互连部分,即焊点、通孔发生故障的可能性。因此确定焊点、通孔的疲劳断裂为单板机的主要故障机理,机理为热疲劳。

焊点和镀通孔热疲劳的故障物理模型为Coffin-Mason模型^[12]和CALCE模型^[13]。其中焊点热疲劳模型为

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

式中 N_f 为疲劳寿命; $\Delta\gamma$ 为应变范围,需要通过应力分析得到; ε_f 为材料常数,对于63Sn37Pb, $\varepsilon_f = 0.325$; c 是与温度循环剖面相关的参数,

$$c = -0.0442 - 0.0006T_s + 0.0174 \ln \left(1 + \frac{360}{t_D} \right)$$

其中 T_s 为焊点温度循环中的平均温度; t_D 为最高温度的保温时间,这些需要根据具体的环境温度剖面确定。

镀通孔热疲劳模型为

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f - \sigma_0}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (3)$$

式中 E 为镀层材料的弹性模量; $\Delta\varepsilon$ 为应变范围; σ_0 为平均应力,这两个参数需要通过应力分析得到; σ_f 为疲劳强度系数; ε_f 为疲劳延展性系数; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延展性指数。这四个参数的取值可以从文献[14]中查到。



图4 单板计算机热分析结果

对该单板机进行建模,利用应力分析软件进行了热分析,该单板机的温度云图,如图4所示。利用96路温度采集系统测试了该单板机上所有器件的壳温。热分析中CPU芯片的壳温为45℃,热测量的壳温为51.2℃,误差为6.8℃,该部位是整个电路板中温度最高的部位之一。为了减小了热分析的误差,根据热测试的结果,调整了热分析中的边界条件,最终得到的

CPU芯片热分析与热测量的结果相差1℃左右。

利用故障物理模型计算了各元器件焊接点与最小尺寸镀通孔^[15]等42个单点故障的TTF。结果显示,SOP封装的随机存储器芯片焊点部位TTF最小,为6.77年。该焊点为整个产品的薄弱环节。完成可靠性评估后得到的产品故障概率密度分布,如图5所示。

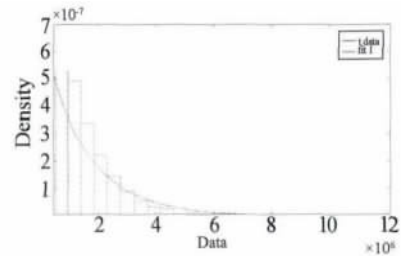


图5 单板机故障密度分布

单板机的概率密度分布函数为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = 1.23 \times 10^{-6} \times e^{-(1.23 \times 10^{-6} t)}$$

故障率为

$$\lambda = 1.23 \times 10^{-6}$$

如果认为单板机不可修,那么其MTBF为81.3万小时。

6 结 语

基于故障物理的可靠性仿真分析方法可以将电子产品的设计参数(元器件和互联部位的结构、电路板的布局等)、所承受的环境条件(热、振动等)和载荷条件(电等)与其寿命和可靠性指标相联系,为评估产品设计改进对可靠性指标的影响提供了方法。

参考文献:

- [1] MARK WHITE, JOSEPH B. B. Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation [M]. National Aeronautics and Space Administration, JPL Publication. 2008.
- [2] MCLEISH J. G. Enhancing MIL-HDBK-217 Reliability Predictions with Physics of Failure Methods [C]//Annual Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium (RAMS) 2010: 1-6.
- [3] 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.
- [4] GANESAN S, EVELOY, V, DAS D, et al. Identification and Utilization of Failure Mechanisms to Enhance FMEA and FMECA [C]//Proceedings of the IEEE Workshop on Accelerated

- Stress Testing & Reliability(ASTR) ,Austin ,Texas 2005.
- [5] DAS D ,AZARIAN M ,PECHT M. Failure Modes ,Mechanisms ,and Effects Analysis(FMMEA) for Automotive Electronics [C]//11th Annual AEC Workshop ,Indianapolis ,in ,2006.
- [6] BLACK J R. Physics of electromigration. IEEE Proceedings of the International Reliability Physics Symposium ,1983: 142-149.
- [7] WU E ,SUNE J ,NOWAK E , et al. Interplay of Voltage and Temperature Acceleration of Oxide Breakdown for Ultrathin Gate Oxides [J]. Solid-State Electron ,2002 ,46: 1 787-1 798.
- [8] BERNSTEIN J ,GURFINKEL M ,LI XJ ,et al. Electronic Circuit Reliability Modeling [J]. Microelectronics Reliability 2006 ,46: 1 957-1 979.
- [9] PECHT M ,KO W. A Corrosion Rate Equation for Microelectronic Die Metallization [J]. The International Society of Hybrid Microelectronics ,1990 ,13(2) : 41-52.
- [10] SUHIR E ,POBORETS B. Solder-Glass Attachment in Cer-dip/Cerquad Packages: Thermally Induced Stresses and Mechanical Reliability [J]. Transactions of the ASME ,1990 ,112(9) : 204-209.
- [11] RAWAL B S ,CHAN N H. Conduction and Failure Mechanisms in Barium Titanate Based Ceramics Under Highly Accelerated Conditions [EB/OL]. [2013-06-28]. <http://www.avxcorp.com/docs/techinfo/barium.pdf>.
- [12] LEE W W ,NGUYEN L T , et al. Solder Joint Fatigue Models: Review and Applicability to Chip Scale Packages [J]. Microelectronics Reliability 2000(40) : 231-244.
- [13] LAU J H. Solder Joint Reliability: Theory and Application [M]. New York: Van Nostrand Reinhold ,1991.
- [14] BHANDARKAR S M ,DASGUPTA A ,BARKER D , et al. Influence of Selected Design Variables on Thermomechanical Stress Distributions In Plated Through Hole Structures [J]. Transaction of the ASME-Journal of Electronic Packaging ,1992 ,114: 8-13.
- [15] 陈颖 霍玉杰 谢劲松 ,等. 印刷电路板设计参数对镀通孔可靠性的影响 [J]. 北京航空航天大学学报. 2007 ,33(8) : 954-958.

作者简介



陈颖(1977—),女,河北唐山人,博士,讲师,主要研究方向为产品的可靠性设计分析,故障学;

E-mail: chenyl@buaa.edu.cn

高蕾(1989—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为电子产品的故障物理方法,故障学;

康锐(1966—),男,辽宁本溪人,教授,博导,主要研究方向为复杂产品故障学。

(上接第443页)

3 结语

从间接熵概念出发,考虑不同故障类型对系统状态的影响,提出了基于两类故障类型的信息熵计算模型。在测点优选中,根据实际装备的维修特点,综合考虑了测点信息熵的数量及其故障率,最后通过一个实际的案例,说明该方法的可行性。

本计算模型的缺点在于当测点和故障模式的数量增加时,计算的复杂度呈现指数增长,因此需将该方法通过计算机实现。

在测点权衡和优选方面,除了所考虑的信息熵和故障率的因素外,维修人员的技能水平,后勤保障费用及测试设备的权衡也是非常关键的因素,这将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 张锡纯. 二熵-源事理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [2] SIMPSON WILLIAM R SHEPPARD JOHN W. System Test and Diagnosis [M]. Kluwer Academic Publishes ,1994.
- [3] 黎琼炜 易晓山 刘冠军. 系统级故障隔离的间接熵法 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 51-54.
- [4] 李演仁 邓斌. 故障熵和故障测试优化 [J]. 空军雷达学院学报 2003 ,17(3) : 34-36.
- [5] 石军友 等. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社 2011.

作者简介



陈卫卫(1982—),女,江苏启东人,博士,主要研究方向为装备测试性设计与分析,网络可靠性测评技术等。

E-mail: Rainychen1209@163.com