

基于 PoF 模型的电子产品可靠性参数计算方法

骆明珠, 陈颖, 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: 现有的基于失效物理(physics of failure, PoF)模型的可靠性预计只能计算电子产品在寿命周期内经历单一典型任务剖面的失效时间。本文提出了一种基于失效物理模型,并利用蒙特卡罗仿真定量分析电子产品在寿命周期内实际经历多任务剖面的可靠性水平的新方法。将该方法应用于某机载电子设备的平均失效前时间(mean time to failure, MTTF)的计算,建立失效率和可靠度的时间函数,与目前国内工程实践中常用的失效率经验模型法以及设备可靠性强化试验的结果进行了对比分析。结果表明,该方法不仅可以计算可靠性参数,而且通过分析计算过程可发现设计薄弱环节与可靠性参数的定量关系,有效指导设计改进。

关键词: 可靠性; 参数计算; 失效物理模型; 蒙特卡罗仿真; 多任务剖面; 失效分布

中图分类号: N 945.17

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.04.31

Method for reliability parameter calculation of electronic products based on physics of failure models

LUO Ming-zhu, CHEN Ying, KANG Rui

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

Abstract: The existing reliability prediction methods based on physics of failure (PoF) models merely calculate electronic products' time to failure responding to a single typical mission profile. A novel reliability parameter calculation method based on PoF models and Monte Carlo simulation is presented, which can quantitatively analyze the reliability of electronic products actually undergoing multiple mission profiles in the whole life cycle. The method is applied to some airborne electronic equipment to calculate the mean time to failure (MTTF) and build time functions of failure rate and reliability. The results are contrastively analyzed with those concluded by the empirical model based method and reliability enhancement testing. It shows that the proposed method can not only calculate reliability parameters but also find out design weaknesses and their quantitative relationships with reliability parameters, which is an effective guidance to design improvements.

Keywords: reliability; parameter calculation; physics of failure (PoF) model; Monte Carlo simulation; multiple mission profile; failure distribution

0 引言

现代电子产品具备高可靠、长寿命的特征,然而因电子产品失效导致系统故障,甚至引发安全事故的现象仍然频出。因此,在电子产品的设计阶段开展可靠性预计工作,定量分析其可靠性水平,可以用来权衡不同设计方案,发现设计薄弱环节并进行设计改进,这对提高产品的可靠性水平具有非常重要的意义。

现有的电子产品可靠性预计方法主要分为基于失效率经验模型和基于失效物理(physics of failure, PoF)模型两类^[1-2]。

目前,国内在工程实践中仍主要采用基于失效率经验模型的方法。MIL-HDBK-217 及其衍生出的适用于不同工程领域的可靠性预计手册,如 GJB/Z299C、IEC-TR-62380 和 Telcordia SR-232 等给出了基于失效率经验模型的电子产品可靠性预计方法。该方法曾在 20 世纪 90 年代备受争议,主要原因包括^[3]:①经验数据来源于外场,其更新速度不能满足将新材料与新工艺快速转化为工程应用的电子产品可靠性评估的发展需求;②仅考虑使用温度与工作应力对失效率的贡献,而这仅占电子产品失效原因的一小部分比例;③预计结果并不能直接说明失效发生的因果关系,只能通过改变元器件类型、质量等

收稿日期:2013-07-19; 修回日期:2013-11-19; 网络优先出版日期:2014-01-02。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20140102.0944.005.html>

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(61104132)资助课题

级或改善使用条件来提高产品可靠性水平。目前较新的一些电子产品可靠性预计手册,如法国航空行业推出的 FIDES 2009^[4] 和美国可靠性信息中心的 RIAC-217Plus 2006^[5],对原有方法进行了改进,即通过不断更新失效率经验数据,并在失效率模型中增加和修订对产品失效率有显著影响的环境应力因子(如温循、湿度、振动和冲击)、生产制造过程因子和使用过程控制因子等,来分析多种因素对产品失效率的贡献。然而,仍然未能解决的问题是:①大量研究和实践结果表明,利用该方法获得的预计结果不仅与产品在现场发生故障的真实情况相差很大,而且依据不同手册得出的预计结果和失效原因也存在较大差异^[6];②基于失效率为常数的假设,未能考虑产品的早期失效和耗损期失效,对产品的质量和耐久性问题无法提出改进措施^[3]。

基于 PoF 模型的可靠性预计方法^[7]已在国外获得了越来越广泛的应用。利用该方法获得的预计结果可表明产品发生失效的多种根原因,如设计与生产工艺的缺陷,使用中环境载荷的作用等,这样可有效地指导设计改进,同时也适用于那些应用新材料、新技术产品的可靠性预计^[8]。鉴于以上优点,正在重新修订中的 MIL-HDBK-217 Rev. G 决定将基于 PoF 模型的方法列入其中^[3,9]。然而,现有的基于 PoF 模型的可靠性预计研究中,只分析了产品在寿命周期

内某一典型任务剖面下的可靠性^[10],只能计算在该任务剖面下的产品失效前时间(time to failure, TTF)及其均值,而这并不是通常意义上的产品可靠性参数,计算结果不能说明某些产品在寿命周期内实际可能经受多种任务剖面作用的可靠性水平。

针对上述问题,本文提出了一种基于 PoF 模型计算电子产品可靠性参数的新方法:分析产品在寿命周期内经历多种任务剖面,即执行多种任务的真实情况;在获得产品详细设计信息的前提下,应用基于计算机仿真的应力分析法模拟产品的使用过程,并将分析结果作为 PoF 模型参数的输入;通过上述参数的蒙特卡罗抽样和多失效机理的失效时间竞争,模拟失效发生过程,获得产品的失效时间样本;统计分析即可得到产品在寿命周期内执行多任务情况下的失效分布,计算可靠性参数,包括平均失效前时间(mean time to failure, MTTF)、可靠度与失效率的时间函数。将上述方法应用于某机载电子设备,并将计算结果与使用 GJB/Z299C-2006 进行可靠性预计的结果和可靠性强化试验结果进行对比分析,验证了该方法的有效性和正确性。

1 计算方法与流程

基于 PoF 模型的电子产品可靠性计算方法与流程如图 1 所示。

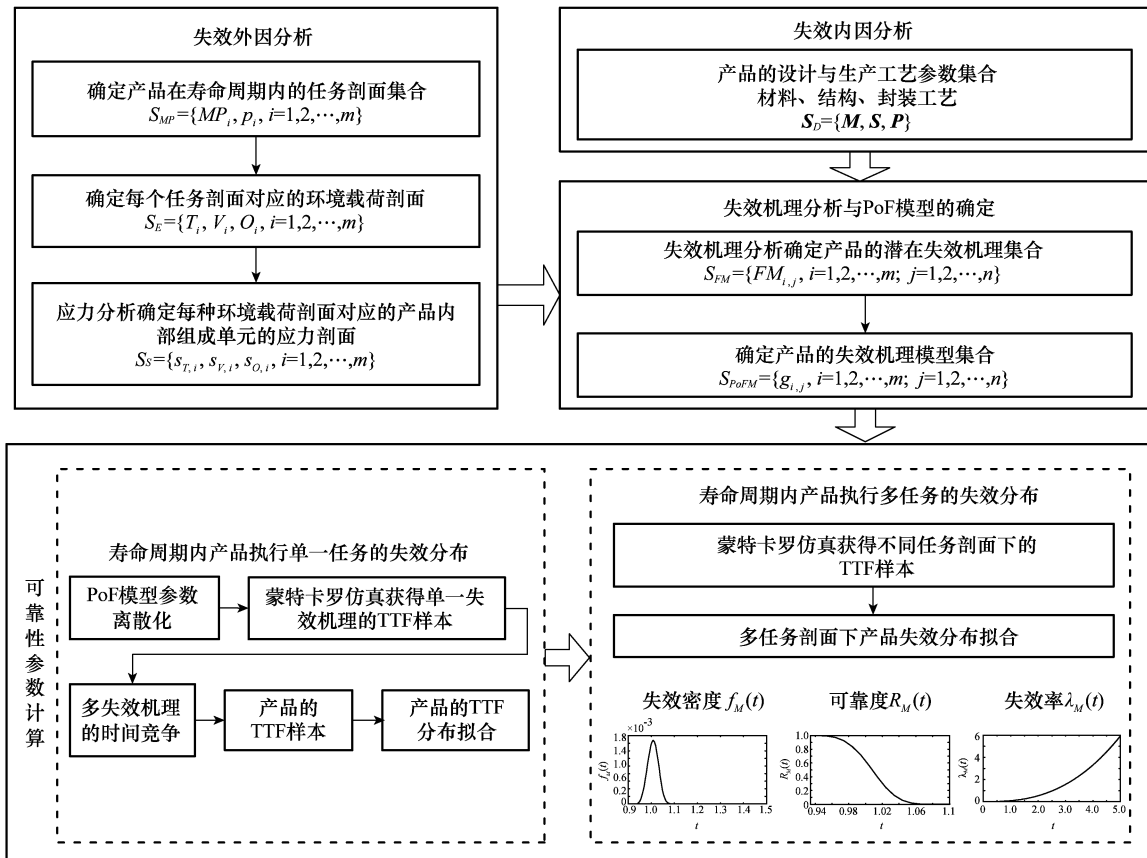


图 1 基于 PoF 模型的可靠性参数计算方法流程

产品的失效是内外因共同作用的结果。外因主要包括产品所要执行的任务、使用过程中所经历的环境条件和人为因素等;内因主要包括产品所用的材料(原料、元器件)、结构(机械结构、电路结构)和生产工艺等。可表示内外因共同作用导致失效发生的 PoF 模型的一般形式为

$$F = g(M, S, P, s) \quad (1)$$

式中, F 为失效机理对应的产品失效特征参数, 如失效时的应力循环次数或失效前时间; M 为材料属性参数向量; S 为结构尺寸参数向量; P 为封装工艺特征参数向量; s 主要为温度、湿度和振动等环境应力参数与电压、电流等工作应力参数的向量。

1.1 失效内因分析

通过对产品的功能结构分析和建模, 收集产品设计与生产工艺参数的详细信息, 获得材料、结构和封装工艺等参数向量的集合 $S_D = \{M, S, P\}$, 作为式(1)的内因输入参数。

1.2 失效外因分析

通过对产品失效的外因分析得到 PoF 模型所需的应力参数向量 s , 需经过以下步骤:

步骤 1 确定产品在寿命周期内的任务剖面集合 $S_{MP} = \{MP_i, p_i, i=1, 2, \dots, m\}$ 。其中, MP_i 为第 i 个任务剖面名称; p_i 为第 i 个任务剖面的执行概率; m 为使用过程中所经历的任务剖面个数。

步骤 2 根据任务剖面集合, 确定产品在执行任务中经受的环境载荷剖面集合 $S_E = \{T_i, V_i, O_i, i=1, 2, \dots, m\}$ 。其中, T_i 为温度载荷剖面; V_i 为振动载荷剖面; O_i 为工作载荷剖面。若有其他类型的环境载荷作用对产品可靠性造成影响, 则也需要列入该集合。

步骤 3 通过应力分析^[11], 即真实试验或计算机仿真的方法将环境剖面集合施加在产品或数字样机上, 得到产品内部组成单元, 包括元器件和部件等对环境载荷的稳态和瞬态响应值, 由此生成应力剖面集合 $S_s = \{s_{T,i}, s_{V,i}, s_{O,i}, i=1, 2, \dots, m\}$ 。其中, $s_{T,i}$ 、 $s_{V,i}$ 和 $s_{O,i}$ 分别为第 i 个任务剖面 MP_i 对应的温度应力剖面、振动应力剖面和工作应力剖面。

步骤 4 根据应力剖面集合, 确定在每个任务剖面下, 导致产品每种失效机理发生的外因应力参数向量 s , 作为式(1)的外因输入参数。

1.3 失效机理分析与 PoF 模型的确定

结合应力分析结果, 利用 (failure modes, mechanisms and effects analysis, FMMEA) 失效机理、模式和影响分析方法^[12] 确定产品在每个任务剖面下的潜在失效机理集合为 $S_{FM} = \{FM_{i,j}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n\}$ 。其中, n 为产品在每个任务剖面下潜在失效机理的个数; $FM_{i,j}$ 为第 i 个任务剖面下产品的第 j 个潜在失效机理。

根据产品的材料、结构和生产工艺特点选择合适的 PoF 模型, 其集合为 $S_{PoFM} = \{g_{i,j}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n\}$, 其中, $g_{i,j}$ 为式(1)所列函数。

1.4 可靠性参数计算

1.4.1 产品在寿命周期内执行单一任务

对单一任务剖面下产品的多个潜在失效机理对应的

PoF 模型输入参数进行离散化^[13], 确定它们的概率分布类型和分布参数值; 利用蒙特卡罗仿真获得 PoF 模型输入参数的抽样值, 代入 PoF 模型进行计算。其中, 对于非恒定应力或高低应力循环的情况, 需要应用累积损伤计算; 每次抽样可得到在该任务剖面下 n 个失效机理对应的 TTF 的大量样本值, 对 n 个值进行排序比较, 利用多失效机理的时间竞争, 认为最短的时间即为产品的 TTF; 多次抽样即可得到产品在该任务剖面下的多个 TTF 样本值; 最后, 根据样本值对产品在该任务剖面下的失效分布进行拟合分析, 获得其 TTF 的分布函数。

1.4.2 产品在寿命周期内执行多任务组合

根据上述步骤可以获得产品在寿命周期内每一个任务剖面下 TTF 分布; 利用蒙特卡罗仿真对 m 个任务剖面下的 TTF 进行多次抽样, 每次抽样可获得样本值 $tf_i (i=1, 2, \dots, m)$; 根据任务剖面的执行概率 p_i , 可得产品在寿命周期内 m 个任务剖面组合下每次抽样的 TTF 样本值为

$$t = \sum_{i=1}^m tf_i \cdot p_i \quad (2)$$

对多次抽样所得上述样本值进行分布拟合, 可得到产品在寿命周期内执行多任务的失效密度函数, 可靠度函数和失效率函数, 并可求得产品的 MTTF。

2 案例研究

本文的研究对象为某航空发动机内的信息采集设备, 属于典型机载电子产品。该信息采集设备由电路板、继电器、传感器、航插和设备箱体等部件组成, 主要包含 5 个模块, 分别为数字信号模块、模拟信号模块、通道选择模块-1、通道选择模块-2 和电源模块, 结构简图如图 2 所示。

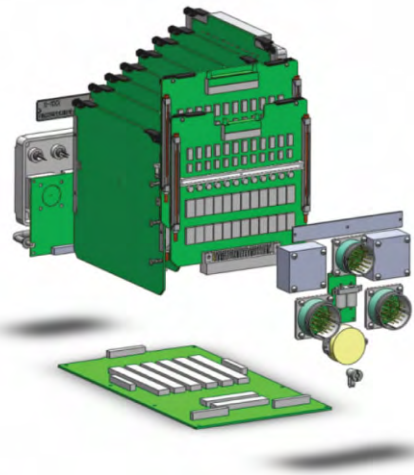


图 2 信息采集设备的简化结构

2.1 确定设备在寿命周期内的任务剖面

任务剖面是对产品在完成规定任务这段时间内所经历的全部重要事件和状态的时序描述。确定设备级产品的任务剖面, 需首先对设备所属系统的任务剖面进行确定和分

析,以确定设备相应的任务和状态。对于机载电子产品,应结合飞机的飞行任务剖面分析其任务剖面。典型的飞机任务剖面及其分段描述如图 3 所示。针对不同的飞行距离、自然与地理环境,飞机可能执行多种不同的飞行任务。不同的任务剖面具有不同的飞行高度、飞行速度等任务剖面特性参数,进而影响机载电子产品的工作状态与经受的环境载荷情况。

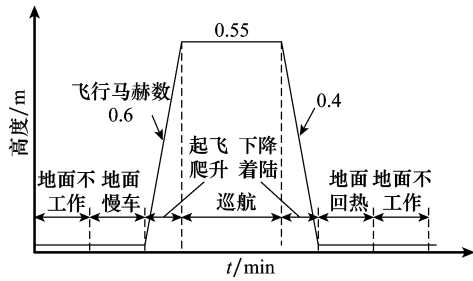


图 3 飞机典型任务剖面特性参数图(示例)

已知信息采集设备所属飞机在其全寿命周期使用中,可能历经 4 种典型的任务剖面,每个任务剖面的名称、执行概率(近似等于出现相对频率)、持续时间如表 1 所示。

表 1 某飞机寿命周期内的典型任务剖面

任务剖面名称	执行概率	持续时间/min
MP ₁	0.11	142
MP ₂	0.06	241
MP ₃	0.04	389
MP ₄	0.8	603

根据设备设计部门提供的数据,绘制包括产品的状态参数、状态持续时间等数值的任务特征参数表,表 2 列出了执行概率最高的任务剖面 MP₄ 的特征参数。

表 2 任务剖面 MP₄ 特征参数

任务阶段	海拔高度/m	马赫数	持续时间/min	产品状态
准备	0	0	30	off
慢车	0	0	30	on
起飞	0~300	0~0.2	3	on
上升	300~9 800	0.2~0.8	20	on
巡航	9 800	0.82	115	on
下降	9 800~300	0.78~0.38	16	on
进场	300	0.19	12	on
着陆	300~0	0.19~0	10	on
回热	0	0	60	on
休整	0	0	60	off

2.2 确定环境载荷剖面

产品的每一个任务剖面对应一个环境载荷剖面。环境载荷剖面是指温度、振动、工作输入等影响产品可靠性的外因参数以及它们的持续时间。可根据经验分析、理论计算、模拟试验、外场实测等多种手段,确定产品的环境载荷剖面参数,包括高/低温幅值与持续时间、温变率、振动加速度均方根与持续时间、加速度功率谱密度、工作电压、电流等,并用图、表形式进行说明。本文采用 GJB 899A-2009《可靠性

鉴定和验收试验》和 GJB 150-2009《军用设备环境试验方法》给出的经验分析法,生成信息采集设备的环境载荷剖面。图 4 给出了任务剖面 MP₄ 下,信息采集设备的环境载荷剖面图。

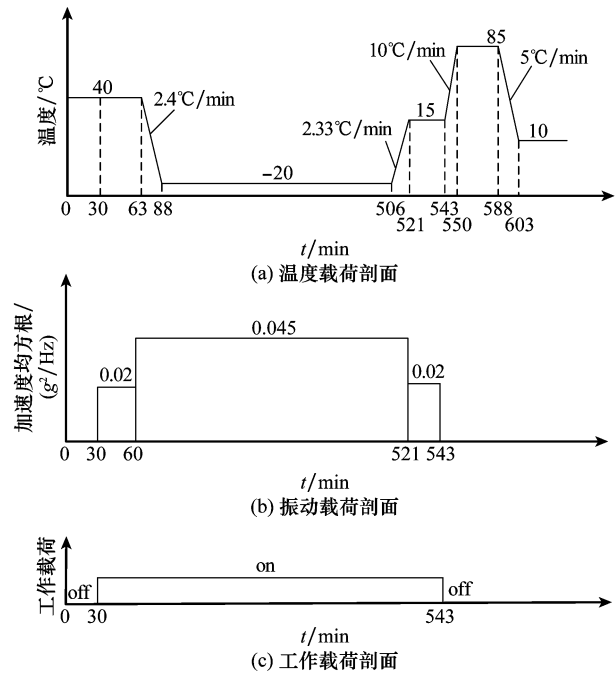


图 4 任务剖面 MP₄ 对应的环境载荷剖面

其中,在进行温度载荷分析时,综合考虑了设备一年内工作在不同空间和地理位置的大气温度变化的影响,即每次执行任务均要至少经历一次从最热天开始工作到最冷天结束工作的温度循环。在进行振动载荷分析时,考虑了发动机工作转速对设备的影响。

2.3 应力分析

采用计算机仿真的方法,将每个环境载荷剖面施加在产品的数字样机上,分析设备整机及其组成单元的局部载荷响应情况,以下给出了对应任务剖面 MP₄ 的部分应力分析结果。

(1) 每一个环境温度下,信息采集设备整机的热分析结果将作为各模块热应力分析的边界条件进行加载,为各模块的应力损伤分析提供热边界条件,以此获得各组成单元(元器件、电路板、焊点等)的温度应力剖面。图 5 和图 6 给出了热分析结果示例。

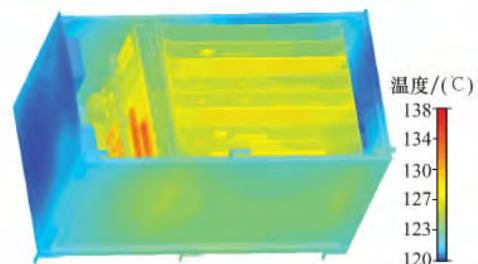


图 5 环境温度 85°C 设备整机温度分布云图

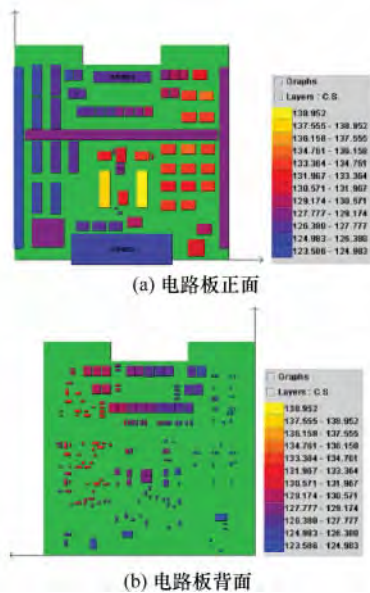


图 6 选择模块-1 上各器件结温

(2) 对信息采集设备进行整机随机振动分析, 得到各电路板和其他部件在振动剖面下的响应, 图 7 给出了振动分析结果示例。

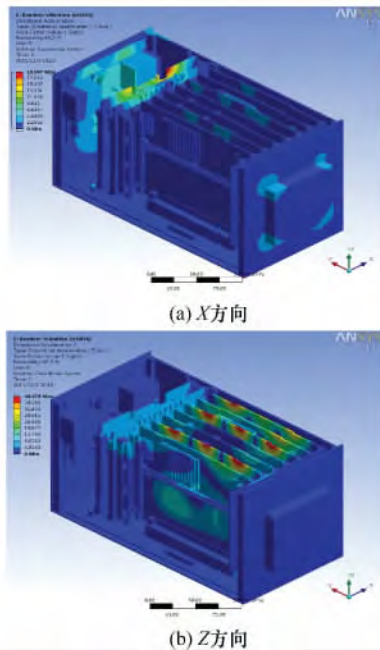


图 7 设备加速度均方根云图

2.4 潜在失效机理分析与 PoF 模型的确定

根据信息采集设备的任务剖面信息, 结合应力分析结果进行 FMMEA 分析, 得知其潜在失效机理主要是由温度应力循环引起的元器件焊点和镀通孔等部件的热疲劳, 以及由随机振动引起的元器件振动疲劳, 对应的失效模式为元器件或部件的开路或功能/性能的间歇性变化。表 3 给出了任务剖面 MP_4 下设备各个模块的潜在失效机理分析

结果, 总计失效点个数为 242。以电源模块为例对 PoF 模型的选择进行详细说明, 如表 4 所示。

表 3 任务剖面 MP_4 下设备潜在失效机理分析结果

潜在失效机理类型	数字信号模块	模拟信号模块	选择模块-1	选择模块-2	电源模块
个数	8	7	9	8	6
潜在失效点个数	32	71	59	70	10

表 4 电源模块潜在失效机理

序号	潜在失效机理类型	对应的失效物理模型
1	无引脚器件的焊点热疲劳	基于应变的 Coffin-Manson 模型 ^[14]
2	J 引脚器件的焊点热疲劳	
3	BGA 封装器件的焊点热疲劳	
4	镀通孔热疲劳模型	CALCE-PTH 模型 ^[15]
5	无引脚器件的随机振动疲劳	Steinberg 模型 ^[16]
6	有引脚器件的随机振动疲劳	

2.5 可靠性参数计算

2.5.1 设备在寿命周期内执行单一任务

利用电子产品可靠性分析软件和计算分析软件等, 将信息采集设备的数字样机(包含设备的材料、结构、生产工艺等信息)、应力分析结果(包含所经受的环境应力剖面)作为 PoF 模型集合的输入, 计算并分析信息采集设备在每个任务剖面下的失效分布情况。

步骤 1 对每个任务剖面下设备的潜在失效机理对应的 PoF 模型参数进行离散化处理, 对应任务剖面 MP_4 有 242 个模型的参数需要处理, 考虑工作量的问题可简单假定为这些参数服从均匀分布或三角分布。

步骤 2 进行一次蒙特卡罗抽样后, 将抽样结果作为 PoF 模型的输入, 同时根据 Palmgren-Miner 线性累积损伤计算, 获得 242 个失效机理对应的 TTF。

步骤 3 对 242 个数值进行升序排序, 并认为最小值为设备的 TTF。

步骤 4 抽样 1 000 次, 获得产品的 1 000 个 TTF 样本值。

步骤 5 由于信息采集设备的潜在失效机理为耗损型, 因此选用适应能力较强的三参数威布尔分布对产品的失效分布进行拟合。三参数威布尔分布的参数估计有多种方法, 本文采用相对简单且能够满足精度要求的最大相关系数法^[17]。

重复以上步骤获得信息采集设备分别在 4 个任务剖面下的失效分布参数和 MTTF, 如表 5 所示。

表 5 设备在寿命周期内执行单一任务的失效分布参数

任务剖面	威布尔分布参数			MTTF/h
	形状参数 β	尺度参数 η	位置参数 γ	
MP_1	2.901 4	9 308	13 915	22 218
MP_2	2.691 3	8 357.9	4 721.3	12 151
MP_3	2.684 7	14 016	14 007	26 467
MP_4	2.883 5	7 167.3	4 183.5	10 576

2.5.2 设备在寿命周期内执行多任务组合

对表 5 中所列的 4 个任务剖面下设备的 TTF 进行 1 000 次蒙特卡罗抽样,根据第 1.4 节中的式(2)计算得到设备在寿命周期内执行多任务组合的 TTF 的 1 000 个样本值,如图 8 所示。

根据最大相关系数法求得各分布参数值,形状参数 β 为 4.523 5,尺度参数 η 为 1 307.772,位置参数 γ 为 28 445.2,则信息采集设备在寿命周期内执行多任务组合下的累积失效分布函数为

$$F_M(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - 28\,445.2}{1\,307.772}\right)^{4.523\,5}\right] \quad (3)$$

式中, t 为设备的 TTF 变量,且 $t \geq 28\,445.2$ 。

由上可得设备的失效密度函数 $f_M(t)$ 、可靠度函数 $R_M(t)$ 和失效率函数 $\lambda_M(t)$,如图 9 所示,并求得设备的 MTTF 为 29 638 h。

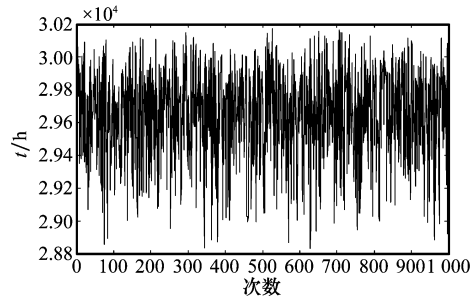


图 8 设备寿命周期内执行多任务的 TTF 样本

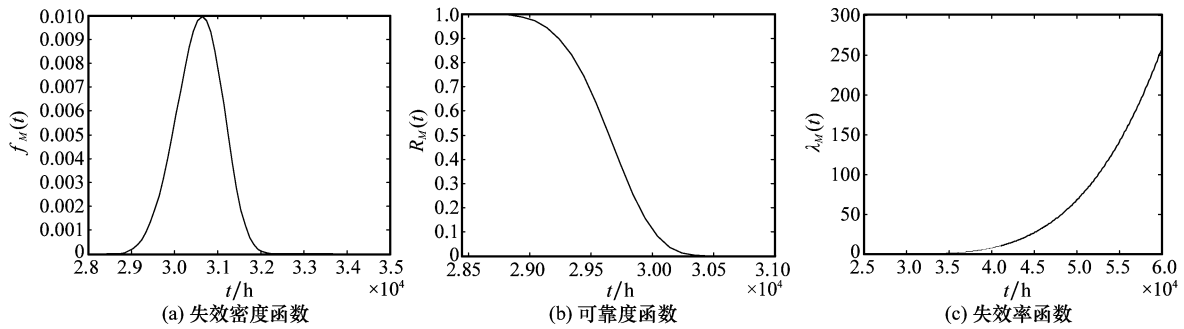


图 9 设备的可靠度和失效率函数图

3 结果分析

根据用户对信息采集设备所在飞机系统提出的任务要求,即每年的飞行小时数和日历寿命,确定信息采集设备的使用寿命要求为 10 000 h。

根据计算结果可知信息采集设备在寿命周期内分别执行 4 种单一任务的 MTTF 值(见表 5)和在寿命周期内执行按某种概率分布的 4 种任务组合的 MTTF 值虽然均大于工作寿命要求(说明现有设计能够满足要求),但可以看出它们差别较大,尤其是只执行任务 MP_2 和 MP_1 的计算结果接近 10 000 h。

除了要计算可靠性参数值以外,根据分析与计算结果确定产品的设计薄弱环节也是可靠性预计的重要目的之一。因此需要关注那些基于 PoF 模型和累积损伤原理,利用蒙特卡罗仿真计算潜在失效机理的 MTTF 小于设备使用寿命要求的元器件和部件,如数字信号模块上某电压调整器和某两个晶体振荡器的焊点热疲劳失效(见图 10),通道选择模块-1 上某运算放大器的振动疲劳失效,通道选择模块-2 上 24 个金属膜固定电阻造成的高温区域引起自身及电路板背面某两个仪用放大器的焊点热疲劳失效,以及电源模块上 4 个贴片陶瓷电容的焊点热疲劳失效。对上述设计薄弱环节可根据需求给出改进措施,如对于焊点热疲劳失效,可通过增加散热装置、更换散热性能好的器件或优化局部器件布局等方法进行改进;对于随机振动疲劳失

效,可通过增加减振装置或改变器件布局的方法进行设计改进。对设计修改的结果再次进行分析,迭代上述过程,直到所有潜在失效点的 TTF 值满足使用要求为止。

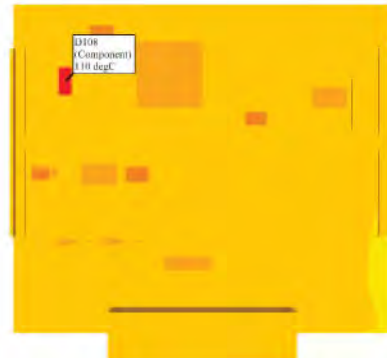


图 10 设备内某电压调整器焊点热疲劳失效示意图

4 有效性验证

根据 GJB/Z299C-2006 中的方法,即假设设备的寿命服从指数分布,应用应力分析法和元器件计数法对该信息采集设备进行了可靠性预计,获得平均故障间隔时间值为 58 373.6 h。与本文所提出方法的计算结果 29 638 h 相比相差很大,且不能给出具体设计薄弱环节。

在信息采集设备的研制阶段,对其开展了可靠性强化试验,用以激发和暴露产品在设计中的薄弱环节。试验过程中发生了 4 处失效,通过失效定位、失效发生时应力分

析、失效机理分析和回归验证,其中2处确定为数字信号模块某电压调整器焊点热疲劳、通道选择模块-1上某些器件的振动疲劳失效,与本文仿真分析结果相符合,验证了本文方法的有效性和正确性。

5 结 论

本文提出了一种基于 PoF 模型计算电子产品可靠性参数的新方法。该方法具有以下优点:

(1) 对产品在寿命周期内可能经历多种任务剖面的真实情况进行分析,对比现有方法只考虑产品在寿命周期内经历一种典型任务剖面的情况,能够获得更加接近实际使用情况的可靠性参数计算结果。

(2) 针对电子产品失效机理的特点,选择适合耗损型失效的寿命分布类型——三参数威布尔分布,而不是简单假设电子产品的寿命服从指数分布,给出了产品的可靠性参数,包括 MTTF、可靠度和失效率的统计分析方法与流程。

(3) 可以实现在设计阶段发现产品可靠性指标与产品的设计、生产工艺参数、所经受的环境载荷参数之间的定量关系,为相对准确地确定产品可靠性薄弱环节,有效指导产品设计改进指明了方向。

参考文献:

- [1] Foucher B, Boullié J, Meslet B, et al. A review of reliability prediction methods for electronic devices[J]. *Microelectronics Reliability*, 2002, 42(8): 1155-1162.
- [2] Goel A, Graves R J. Electronic system reliability: collating prediction models[J]. *IEEE Trans. on Device and Materials Reliability*, 2006, 6(2): 258-265.
- [3] McLeish J G. Enhancing MIL-HDBK-217 reliability predictions with physics of failure methods[C]// *Proc. of the Reliability and Maintainability Symposium*, 2010:1-6.
- [4] FIDES Group. FIDES guide 2009 edition A. Reliability methodology for electronic systems[EB/OL]. [2013-07-15]http://www.fides-reliability.org.
- [5] Reliability Information Analysis Center. Handbook of 217Plus™ reliability prediction models [EB/OL]. [2013-07-15] http://theriac.org/.
- [6] Held M, Fritz K. Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models; FIDES and RIAC 217Plus[J]. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(9/11): 967-971.
- [7] 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.
- [8] Bechtold L D. Industry consensus approach to physics of failure in reliability prediction[C]// *Proc. of the Reliability and Maintainability Symposium*, 2010:1-4.
- [9] Harms J W. Revision of MIL-HDBK-217, reliability prediction of electronic equipment[C]// *Proc. of the Reliability and Maintainability Symposium*, 2010:1-3.
- [10] Chen Y, Xie L M, Kang R. Reliability prediction of single-board computer based on physics of failure method[C]// *Proc. of the 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011: 1454-1458.
- [11] McKeown S A. *Mechanical analysis of electronic packaging systems*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [12] Das D, Azarian M, Pecht M. Failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) for automotive electronics[C]// *Proc. of the 11th Annual Automotive Electronics Council Reliability Workshop*, 2006.
- [13] Xie L M. Research on the probabilistic physics of failure methods for electronic products[D]. Beijing: Beihang University, 2012. (谢丽梅. 电子产品概率失效物理(PPoF)方法及案例研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.)
- [14] Engelmaier W. Fatigue life of leadless chip carriers solder joints during power cycling[J]. *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1983, 6(3): 232-237.
- [15] 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 American Society of Mechanical Engineers-Journal of Electronic Packaging*, 1992, 114(1): 8-13.
- [16] Steinberg D S. *Vibration analysis for electronic equipment*[M]. New York: Wiley, 1991.
- [17] Yan X D, Ma X, Zheng R Y, et al. Comparison of the parameters estimation methods for 3-parameter Weibull distribution[J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2005, 18(3): 301-305. (严晓东, 马翔, 郑荣跃, 等. 三参数威布尔分布参数估计方法比较[J]. 宁波大学学报(理工版), 2005, 18(3): 301-305.)

作者简介:

骆明珠(1982-),女,博士研究生,主要研究方向为系统故障行为分析与建模、故障诊断与预测、测试性分析与验证。

E-mail:luomingzhu@dse.buaa.edu.cn

陈颖(1977-),女,讲师,博士,主要研究方向为故障学、电子产品故障物理。

E-mail:cheny@buaa.edu.cn

康锐(1966-),男,教授,硕士,主要研究方向为复杂系统可靠性理论与方法、综合保障工程、系统工程理论与方法。

E-mail:kangrui@buaa.edu.cn