

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103941

基于失效物理的多模式耦合可靠性建模方法*

宋常亮¹ 孙博² 唐泽波¹ 李豫² 吴泽豫²

(1. 贵州航天电子科技有限公司 贵阳 550009; 2. 北京航空航天大学可靠性工程研究所 北京 100191)

摘要: 电子系统由于其功能结构复杂,且工作在多载荷耦合的复杂环境条件下,导致其失效模式较多。因此,电子系统的失效更多的是多个失效模式共同作用的结果。而目前关于电子系统多模式耦合条件下的可靠性建模方法较少。针对电子系统多模式耦合条件下的可靠性建模方法进行研究。首先,通过基于失效物理的可靠性仿真分析方法获取各个单一失效模式的寿命分布信息,进而利用 Copula 函数对多模式耦合下的系统建立可靠性模型,给出了可靠度计算方法。最后,以某型综合电子系统进行案例研究,说明提出的方法能够获取更为准确的系统可靠度计算结果,避免了过于保守的可靠性评估。

关键词: 多模式耦合; Copula 函数; 可靠性建模; 失效物理

中图分类号: TN06; V243.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.40

Multi-mode coupling reliability modeling method based on physics of failure

Song Changliang¹ Sun Bo² Tang Zebo¹ Li Yu² Wu Zeyu²

(1. Guizhou Aerospace Electronic Technology Co., Ltd., Guiyang 550009, China;

2. Institute of Reliability Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The failure modes of electronic systems are various due to the complex functional structure and operation under complex environmental conditions of multi-load coupling. Therefore, the malfunction of the electronic system can be regarded as the result of the mutual combination of multiple failure modes. At present, there are few reliability modeling methods considering the multi-mode coupling of electronic systems. This paper studies the reliability modeling method under the condition of multi-mode coupling of the electronic system. First, each failure mode's life distribution information is obtained through the reliability simulation analysis method based on the physics of failure. Then the Copula function is utilized to establish the reliability model of the multi-mode coupling system, and the reliability calculation method is given. Finally, a case study of a specific type of integrated electronic system shows that the method proposed in this paper can achieve more accurate calculation results of reliability, and avoid overly conservative in reliability assessment.

Keywords: multi-mode coupling; Copula function; system reliability model; physics of failure

0 引言

电子系统作为众多复杂装备的核心系统,具有功能结构复杂、技术性能先进、信息密集、高度集成、协同复杂等诸多特征,且工作在多载荷耦合的复杂环境条件下,导致其失效模式较多^[1-2]。电子系统的失效更多的是多个失效模式共同作用的结果。目前,针对多模式耦合建模方法主要分为两种情况:1)假设多个失效模式相互独立,

采用竞争失效原则进行分析,虽然该方法能够较为简单快速地得到分析结果,但其精度相对较低;2)考虑失效模式之间的相关性,进行多失效模式耦合建模,虽然能够得到较为准确真实的分析结果,但建模难度较大同时容易引入主观不确定性误差^[3-5]。因此,电子系统中的多失效模式耦合问题,以及相应的耦合模式下可靠度评估计算问题已经成为其可靠性建模的技术瓶颈^{[6]-[8]},需要重点研究与攻克,提升建模与仿真的精度,提高可靠性模型的适用性。

收稿日期: 2021-01-27 Received Date: 2021-01-27

* 基金项目: 国防基础科研计划(JSZL2018204B002)项目资助

在考虑相关性的研究中, Copula 函数作为一种具有良好数学性质的相关分析工具,能够有效降低在考虑多失效模式耦合情况下的建模难度和计算量。Sun 等^[8]提出了一种基于 Copula 函数的 LED 多失效模式退化数据的可靠性建模分析方法。刘崇屹等^[10]针对多元相关退化量的竞争失效预测问题,在分析雷达导引头失效特性的基础上,建立了多参数相关退化的竞争失效状态预测模型。尽管 Copula 函数能够有效解决多失效模式耦合建模的问题,但是在构建 Copula 函数时需要确定边缘概率密度函数,也就是各个失效模式对应的概率密度函数。但是,系统复杂度不断提高,这对获取各个失效模式的概率密度函数造成了较大困难,难以获取充足的试验数据来计算所需的概率密度函数。因此,通过失效物理分析的方法来获取失效模式的概率密度函数成为了近年来相关研究的热点。骆明珠等^[11]应用失效物理方法对惯导电路进行了可靠性预计。郭来小^[12]应用失效物理方法对功率半导体器件建立了失效机理模型,并设计了相应的加速试验方案。Pecht 等^[13]针对温度条件影响下的微电子器件开展了失效物理分析。但目前,失效物理方法的应用主要集中在器件级和电路板级产品,无法有效的实现对系统级电子产品的建模。

针对上述问题,本文综合了 Copula 函数和失效物理方法的优势,进一步考虑多种失效模式耦合的情况,提出了基于失效物理的电子系统多模式耦合可靠性建模方法,通过失效物理仿真计算单元级失效模式概率密度函数,并综合各单元级基于失效物理的可靠性建模分析结果,构建多失效模式耦合条件下的系统级可靠性模型。

1 研究方法

基于失效物理的电子系统多模式耦合可靠性建模方法的基本步骤如图 1 所示。首先,通过基于失效物理的可靠性仿真分析方法获取各个失效模式的寿命分布信息。然后,运用 Copula 函数对电子系统的器件进行多模式耦合建模, Copula 函数是一种把多元随机变量的联合分布函数和它的各分量的边缘分布函数联系起来的函数,它具有许多优良的性质,能够较好的刻画各变量之间的耦合关系^[14-15]。进而,依据电子系统的层次关系,利用器件级产品多模式耦合分析结果,通过可靠性框图建立电子系统模型,实现多模式耦合条件下系统级可靠性分析。

1.1 基于失效物理的单模式可靠性仿真方法

基于失效物理的可靠性仿真分析方法是通过对失效模式、机理与影响分析,得到分析对象潜在失效点的失效机理模型,进而利用产品的材料、几何、工艺和环境应力等参数,建立分析对象的数字仿真模型,包括计算机辅助设

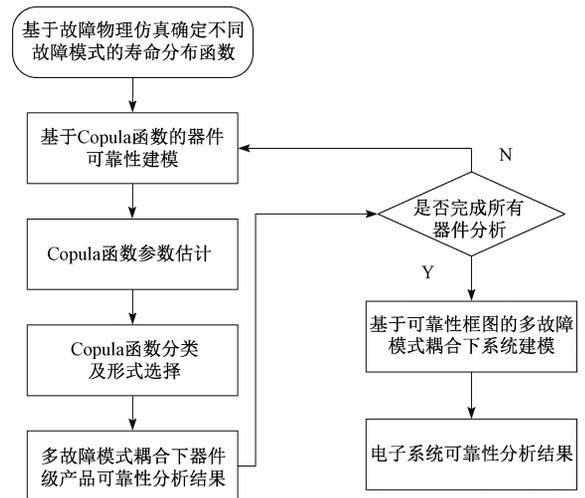


图 1 基本步骤

Fig. 1 Basic steps

计 (computer aided design, CAD) 模型、计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型以及有限元分析 (finite element analysis, FEA) 模型。在数字仿真模型的基础上,结合失效机理模型,依靠计算机仿真计算各潜在失效点的失效前时间的失效信息矩阵,进而通过拟合方法得到各潜在失效点的寿命分布。

失效机理模型是应用失效物理方法的重要基础,其建立的基础是对产品失效规律的了解。失效机理模型可以定义为基于对产品失效机理以及失效根本原因的认知而建立的确定性数学模型。失效机理模型通常给出了特定失效机理下,产品的寿命、可靠性或性能参数等同产品自身的几何特性参数、材料特性参数以及各种典型的环境载荷参数 (如温度、湿度、振动等) 之间的函数关系式^[15-20]。其典型的函数关系式可表示为:

$$TTF_i = f(g, m, e, o, \dots) \quad (1)$$

式中: TTF_i 为产品在第 i 个失效机理下的寿命; g, m 为产品自身相关的几何、材料设计工艺等参数; e, o 为产品寿命周期内的各种环境、工作载荷等参数。

目前,基于失效物理的可靠性仿真分析方法已经得到了广泛的研究,具体应用步骤可参考文献^[18]。通过基于失效物理的可靠性仿真分析方法能够得到器件在单失效模式下的寿命分布,进而可以为后续的多失效模式耦合下系统建模提供数据输入。

1.2 基于失效物理的多模式可靠性仿真方法

1) 多失效模式耦合下器件级建模

(1) 器件级建模方法

电子系统的失效通常是由其组成器件的失效引起,在环境应力等外因以及自身制造工艺、封装材料等内因的共同作用下,会诱发出电子器件多种失效模式,并且各

个失效模式之间表现出一定的相关性。因此,本文选择 Copula 函数对器件级产品建立可靠性模型。

Copula 函数是由 Sklar 首次提出的, n 维 Copula 函数 C 具有如下性质。

C 的定义域为 $[0, 1]^n$ 。

C 有零基面且对每个变量都是递增的。

C 的边缘分布 $C_n, n = 1, 2, \dots, N$, 且满足式(2)。

$$C_n(u_n) = C(1, \dots, 1, u_n, 1, \dots, 1) = u_n \quad (2)$$

式中: $u_n \in [0, 1], n = 1, 2, \dots, N$ 。

Sklar 定理是应用 Copula 理论开展建模分析的关键定理, Sklar 定理的定义如下。

设 n 维随机变量的联合分布为 H, F_1, F_2, \dots, F_n 分别为其边缘分布函数, 那么存在一个 Copula 函数 C , 对所有 $x \in R^n$ 都有:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (3)$$

其中, 如果 F_1, F_2, \dots, F_n 为连续函数, 则 Copula 函数唯一确定的。

假设电子系统中的某一电子器件存在 $n(n \geq 2)$ 种失效模式, 且各失效模式不相互独立, 即具有耦合关系。 n 个失效模式分别用 X^1, X^2, \dots, X^n 表示, 其中有 m 个失效模式具有耦合关系, 与其他 $n - m$ 个失效模式独立, 独立的 $n - m$ 个失效模式用 $X^{m+1}, X^{m+2}, \dots, X^n$ 表示, 并且这 $n - m$ 个失效模式间也是相互独立的。 则设失效模式 X^i 对应的器件寿命为 T_i , 相应的累积分布函数为 $F_i(t) = P\{T_i \leq t\}$, 则 T_1, T_2, \dots, T_m 的联合分布函数为:

$$F(t_1, t_2, \dots, t_m) = P\{T_1 \leq t_1, T_2 \leq t_2, \dots, T_m \leq t_m\} \quad (4)$$

依据 Sklar 定理, 存在一个 m 维 Copula 函数 $C_{1, \dots, m}$ 使得下式成立:

$$F(t_1, t_2, \dots, t_m) = C_{1, \dots, m}(F_1(t_1), F_2(t_2), \dots, F_m(t_m)) = C_{1, \dots, m}(u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (5)$$

进一步假设器件寿命为 T , 且 $T = \min(T_1, T_2, \dots, T_n)$ 。 在初始时刻时器件为无失效状态, 即 $t = 0$ 时, 该器件的可靠度 $R(t)$ 为:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = P(\min(T_1, T_2, \dots, T_n) > t) = \\ &P(\min(T_1, T_2, \dots, T_m) > t) \cdot P(\min(T_{m+1}, T_{m+2}, \dots, T_n) > t) = \\ &P(T_1 > t, \dots, T_m > t)P(T_{m+1} > t, \dots, T_n > t) = \\ &P(T_1 > t, \dots, T_m > t)P(T_{m+1} > t) \cdots P(T_n > t) \end{aligned} \quad (6)$$

依据不交和性质以及 Sklar 定理, 将 $P(T_1 > t, \dots, T_m > t)$ 表示为 Copula 函数形式。

$$\begin{aligned} P(T_1 > t, \dots, T_m > t) &= 1 - \sum_{i=1}^m u_i + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq m} C_{i_1, i_2}(u_{i_1}, \\ &u_{i_2}) + \dots + (-1)^k \sum_{11 < i_1 \leq \dots < i_k \leq m} C_{i_1, \dots, i_k}(u_{i_1}, \dots, u_{i_k}) + \dots + \\ &(-1)^m C_{1, \dots, m}(u_1, \dots, u_m) \end{aligned} \quad (7)$$

则该器件的可靠度为:

$$\begin{aligned} R(t) &= \left[1 - \sum_{i=1}^m u_i + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq m} C_{i_1, i_2}(u_{i_1}, u_{i_2}) + \dots + \right. \\ &(-1)^k \sum_{11 < i_1 \leq \dots < i_k \leq m} C_{i_1, \dots, i_k}(u_{i_1}, \dots, u_{i_k}) + \dots + \\ &\left. (-1)^n C_{1, \dots, n}(u_1, \dots, u_m) \right] \cdot \prod_{p=m+1}^n R^{(p)} \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 参数估计

采用二阶段估计法可将 Copula 模型的参数估计分解为两步, 能够有效降低参数估计难度。 首先应用极大似然估计法估计各个边缘分布中的参数, 再由得到的边缘分布估计 Copula 模型中的参数。 二阶段极大似然法的基本步骤如下。

步骤 1):

$$\hat{\theta}_n = \arg \max_{\theta \in R} \sum_{m=1}^M \ln f_n(t_{nm}; \theta_n) \quad (9)$$

其中 $n = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤 2):

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_c &= \arg \max_{\theta \in R} \sum_{m=1}^M \ln c(F_1(t_{1m}; \hat{\theta}_1), F_2(t_{2m}; \hat{\theta}_2), \dots, \\ &F_N(t_{Nm}; \hat{\theta}_N)) \end{aligned} \quad (10)$$

(3) Copula 函数选择

结合上述分析, Copula 函数的选择好坏直接关系到参数之间的相关结构描述, 将上述常用 Copula 函数及其参数特性如表 1 所示, 从中选择出合适的 Copula 函数的步骤如下。

①依据各失效模式下寿命分布函数生成样本点, 进而计算变量于各样本点处的经验分布函数值, 绘制各个失效模式间的经验分布函数的频数直方图和频率直方图, 从而通过图形形状对 Copula 模型的选择进行初步判断;

②应用赤池信息量准则(akaike information criterion, AIC)进行判别排序用极大似然估计法得到的 Copula 模型, 如果计算的 AIC 值越小, 说明模型的拟合程度更高。

$$AIC = -2 \ln MLE + 2k \quad (11)$$

式中: k 表示 Copula 模型中参数个数; $\ln MLE$ 是对数似然函数值。 综合选择结果, 得到最合适的 Copula 函数。

2) 多失效模式耦合下系统建模

可靠性框图法通过采取连接的网络构架图阐述系统实现性能模块的方式, 其重点反映出实现相应系统模块的任意单元间的顺序关系。 可靠性框图是以器件失效分析为基础, 在得到系统可靠性框图以及各器件可靠度的基础上, 依据相应的计算公式, 计算出系统可靠度。 系统的任务可靠性模型中, 一般包括了串联模型、并联模型以及 K/N 冗余模型。

表 1 典型 Copula 函数和其属性特征

Table 1 Typical Copula function and its attributes

模型	相关程度参数	$C_\theta(u_1, u_2, \dots, u_n)$
Gumbel	$\theta \in (0, 1]$	$\exp(- [(-\ln u_1)^{\frac{1}{\theta}} + (-\ln u_2)^{\frac{1}{\theta}} + \dots + (-\ln u_n)^{\frac{1}{\theta}}]^\theta)$
Frank	$\theta \in (0, \infty)$	$-\frac{1}{\theta} \log[1 + \frac{(e^{-\theta u_1} - 1)(e^{-\theta u_2} - 1) \dots (e^{-\theta u_n} - 1)}{e^{-\theta} - 1}]$
Clayton	$\theta \in (0, \infty)$	$\max((u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} + \dots + u_n^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}, 0)$
Gauss	$\rho \in (0, 1]$	$\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \dots \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_n)} \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \rho ^{1/2}} \exp[-\frac{1}{2}(\vec{x})^T \rho^{-1}(\vec{x})] dx_1 dx_2 \dots dx_n$

(1) 串联模型

在串联系统中,各节点必须均正常运行,才能保证整个功能结构的正常运行,假设串联系统中包含 i 个器件节点,各器件节点相互独立,即一个器件节点的失效与否不会改变其他器件节点的可靠度,则系统可靠度为:

$$R_s(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_i(t) \times \dots \times R_n(t) \tag{12}$$

式中: $R_s(t)$ 为系统可靠度; $R_i(t)$ 为器件节点可靠度, $i=1,2,\dots,n$

(2) 并联模型

在并联系统中只有使所有节点都失效时,并联系统才会发生失效,假设 i 个独立节点并联,则系统可靠度为:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \tag{13}$$

式中: $R_s(t)$ 为系统可靠度; $R_i(t)$ 为器件节点可靠度, $i=1,2,\dots,n$

(3) K/N 冗余模型

当 n 个完全相同且相互独立 i 的节点中至少有 k 个节点无失效时,系统才能正常工作。则符合 K/N 冗余模型的系统可靠度为:

$$R_s(t) = \sum_{x=k}^n C_x^n R(t)^x (1 - R(t))^{n-x} \tag{14}$$

式中: $R_s(t)$ 为系统可靠度。

2 案例分析

本文选择某型综合电子信息系统集成化处理器系统作为案例,图 2 所示为该一体化处理器系统的 CAD 模型。其主要由数字信号与数据处理器 DSP 板、FPGA 板,数字波束形成处理器 DSP 板、FPGA 板以及电源板组成,并且各个电路板上分布着大量的各种类型的元器件。

由于该电子信息系统集成较为复杂,器件众多,且篇幅所

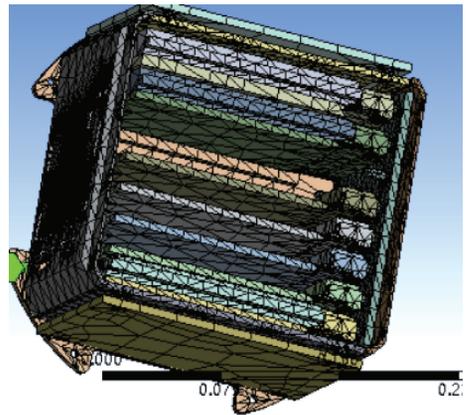


图 2 案例对象结构示意图

Fig. 2 Case object structure diagram

限,这里仅以数字信号与数据处理器 DSP 板中某一型号电容 C_1 为例对本文所提出的方法进行说明。电容 C_1 为无引脚 LCC 封装器件,应用基于失效物理的单模式可靠性仿真分析方法对其进行分析。其中,热疲劳以及振动疲劳是其主要失效机理。根据可靠性仿真分析方法,可得对应的寿命分布函数,如表 2 所示。

表 2 器件 C_1 失效机理的寿命分布函数

Table 2 Life distribution function of C_1

序号	失效机理	分布类型	分布参数
1	热疲劳	威布尔分布	$Wbl(2.18, 18.330, 378.04)$
2	振动疲劳	威布尔分布	$Wbl(2.16, 19335, 517.80)$

依据器件 C_1 的热疲劳以及振动疲劳失效机理进行分析所得到的分析结果,进行多失效模式耦合下的建模分析,首先,将器件 C_1 的两种模式下的寿命分布函数作为边缘分布函数。进而,根据边缘分布函数分别生成两种失效模式对应的寿命样本,计算得到样本点处的经验分布函数值,进而分别绘制出器件 C_1 两个失效模式下经

验分布函数值的频数直方图和频率直方图,器件 C_1 热疲劳失效寿命和振动疲劳失效寿命的频数直方图和频率直方图如图 3 和 4 所示。

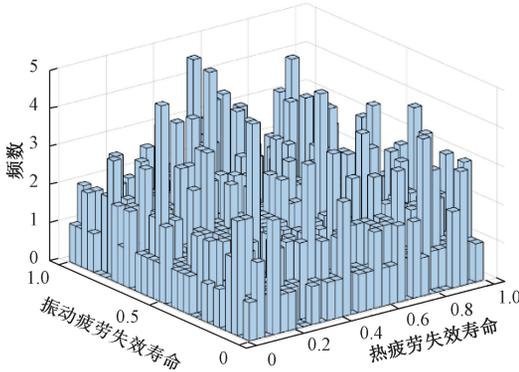


图 3 器件 C_1 两失效模式寿命分布频数直方图

Fig. 3 Frequency histogram of C_1 with two failure modes

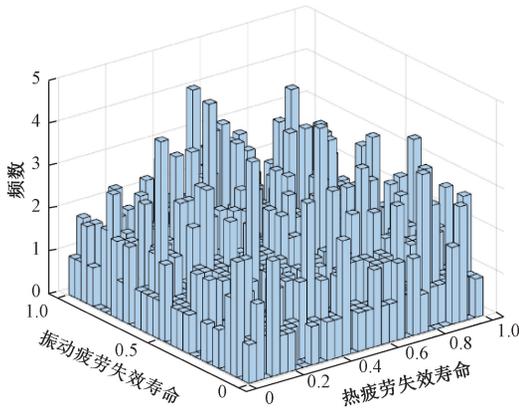


图 4 器件 C_1 两失效模式寿命分布频率直方图

Fig. 4 Relative frequency histogram of C_1 with two failure modes

从频率直方图可以看出,其呈现出对称的尾部分布特征,说明两个失效模式下器件 C_1 寿命表现对称相关特征,而没有明显的尾部相关性。也就是说,器件 C_1 的两种失效模式振动疲劳和热疲劳之间的相关关系为对称相关,而没有体现出明显的上尾或下尾相关性,因此,可以选择初步 Gaussian Copula 函数和 Frank Copula 函数,作为描述器件 C_1 两种失效模式之间的相关关系的 Copula 函数。

对初步选择的 Copula 函数中的未知参数进行估计。由于已通过失效物理仿真确定了边缘分布函数,这里直接应用极大似然估计法计算 Copula 函数中的未知参数估计值,Gaussian Copula 函数和 Frank Copula 函数模型中未知参数估计值,如表 3 所示。

进而计算各 Copula 函数的 AIC 值,如表 4 所示。

表 3 参数估计值

Table 3 Parameter estimate

Copula	Frank	Gaussian
参数估计值	44.523 1	0.987 0

表 4 AIC 值

Table 4 AIC

Copula	Frank	Gaussian
AIC	-50.116 7	-57.171 9

根据 AIC 准则的选择理论,Gaussian Copula 函数对应的 AIC 值最小,这说明拟合效果更好,能更好的描述器件 C_1 两种失效模式之间的相关关系。综合上述 3 种步骤从数据的直观散点图到 AIC 信息准则的计算,综合选择出最合适的 Copula 函数为 Gaussian Copula 函数。

在确定 Copula 函数类型之后,可根据计算得到器件 C_1 的可靠度函数公式为:

$$R(t) = P(T_1 > t_1, T_2 > t_2) = 1 - P(T_1 < t_1) - P(T_2 < t_2) + P(T_1 < t_1, T_2 < t_2) = 1 - \Phi_1(t_1) - \Phi_2(t_2) + F(\Phi_1(t_1), \Phi_2(t_2)) \quad (15)$$

$$F(x, y) = C(u_1, u_2; \hat{\theta}) = -\frac{1}{\hat{\theta}} \ln \left(1 + \frac{(\exp(-\hat{\theta}u_1) - 1)(\exp(-\hat{\theta}u_2) - 1)}{\exp(-\hat{\theta}) - 1} \right) \quad (16)$$

与单模式竞争失效下的可靠度进行对比,如图 5 所示,基于竞争失效下的器件可靠性模型相比基于多失效模式耦合的器件可靠度模型,评估结果普遍偏小。在 400 d 时两者的可靠度计算结果相差 60%,这是由于本文提出的模型考虑了各失效模式间相关性对可靠性的影响。

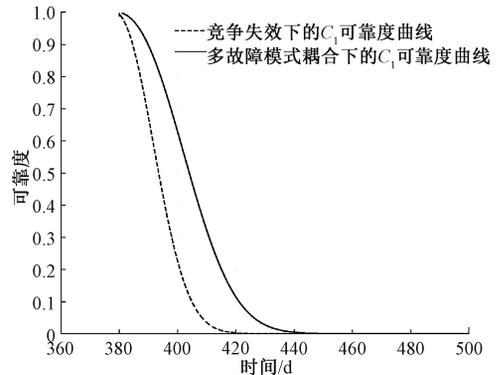


图 5 器件 C_1 两种可靠度曲线对比

Fig. 5 Two reliability curves of device C_1

依据相同的方法计算其余器件的可靠度函数,进而

构建可靠性框图,实现多失效模式下系统建模,由于 DSP 板的器件众多,为了便于建立可靠性框图,增加功能电路虚节点,依据功能对器件进行分类,将其划分为电源电路、时钟电路、配置电路(SP3)、DDR3 存储电路、DSP 电路、接口电路等。这里以简化的时钟电路为例来对多失效模式耦合条件下系统建模过程进行说明。简化的时钟电路的可靠性框图如图 6 所示。

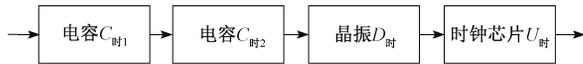


图 6 简化时钟电路可靠性框图

Fig. 6 Simplified clock circuit reliability block diagram

根据图 6 可知,简化时钟电路的可靠性框图为串联模型,则可得简化时钟电路的可靠度函数为:

$$R_{\text{时}}(t) = R_{C_{\text{时}1}}(t) \times R_{C_{\text{时}2}}(t) \times R_{D_{\text{时}}}(t) \times R_{U_{\text{时}}}(t) \quad (17)$$

根据式(17),将各个器件依据 Gaussian Copula 函数计算得到的多模式耦合下的可靠度计算值代入模型中,得到简化时钟电路随时间的增加而变化的可靠度,形成简化时钟电路可靠度随时间变化的可靠度曲线。为了分析多失效模式耦合对简化时钟电路可靠度的影响,将其与竞争失效下简化时钟电路可靠度曲线进行对比,如图 7 所示。可见在 230 d 时,多失效模式耦合下简化时钟电路的可靠度要高于竞争失效下的可靠度 0.4。

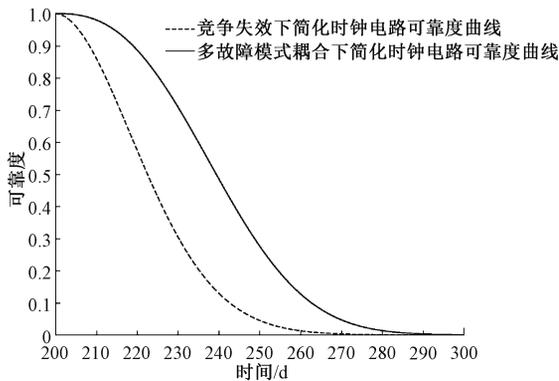


图 7 简化时钟电路两种可靠度曲线对比

Fig. 7 Two reliability curves of simplified clock circuit

通过上述方法步骤,对一体化处理器系统进行逐层计算,得到一体化处理器系统的可靠度。一体化处理器系统两种可靠度曲线对比结果如图 8 所示。可以看出,一体化处理器系统的可靠度随时间变化受其组成单元的影响较大。前期可靠度降低速度较快,而随着时间的增加,其可靠度的降低趋势逐渐减小,后期渐趋于平缓。但是两者的差异较小,其享相差 26%。相比于竞争失效条件下的可靠度,同一时刻的考虑多失效模式耦合条件下

的可靠度相对较高,这样避免了过于保守的估计,使得在依据可靠度进行后续规划时,减少过度维修而造成的资源浪费。

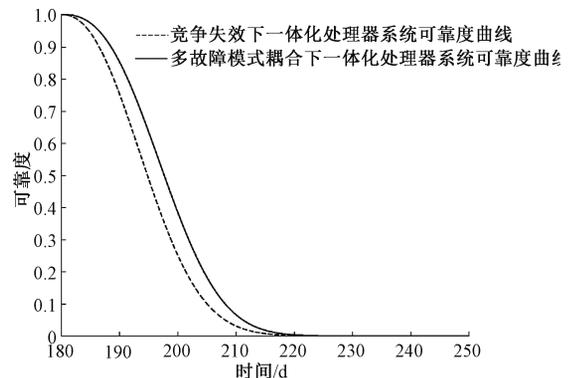


图 8 一体化处理器系统两种可靠度曲线对比

Fig. 8 Comparison of two reliability curves of integrated processor system

3 结 论

本文针对电子系统多模式耦合条件下的可靠性建模方法进行研究。在传统单一失效模式研究的基础上,给出了多模式耦合下的系统级失效物理建模方法。首先,通过基于失效物理的可靠性仿真分析方法获取各个失效模式的寿命分布信息,进而充分利用 Copula 函数对多模式耦合下的系统分别建立了串联结构、并联结构以及混联结构可靠性模型,充分考虑了多模式耦合作用,并给出了相应的可靠度计算方法。以某型电子系统关键组件进行案例研究,说明本文提出的方法能够获取更为符合工程实际的计算结果。

参考文献

- [1] YE Z S, XIE M. Stochastic modeling and analysis of degradation for highly reliable products [J]. Applied Stochastic Models in Business & Industry, 2015, 31(1): 16-32.
- [2] CHEN Y X, JIN Y, KANG R. Coupling damage and reliability modeling for creep and fatigue of solder joint[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 75: 233-238.
- [3] 朱耀东, 徐帅, 张建忠. 多电平变流器系统可靠性建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 70-78.
ZHU Y D, XU SH, ZHANG J ZH. Reliability modeling and analysis of multilevel converter systems[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 70-78.
- [4] SUBULAN K. An interval-stochastic programming based approach for a fully uncertain multi-objective and multi-mode resource investment project scheduling problem with

- an application to ERP project implementation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 19: 1-30.
- [5] JIAO Z X, CAO Y, YAN L, et al. Design and analysis of novel linear oscillating loading system[J]. *Applied Science-Basel*, 2019, 9(18): 1-14.
- [6] YOUSUF A, HAKIM N. Investigation on chirping induced performance degradation in single mode directly modulated 1.55um DFB laser[J]. *Journal of Optical Communications*, 2019, 40(1): 31-36.
- [7] 许高斌, 余智, 徐礼建, 等. 复杂环境电容式微加速度传感器可靠性分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(8): 154-159.
- XU G B, YU ZH, XU L J, et al. Reliability analysis for MEMS accelerometer under multiple environments[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(8): 154-159.
- [8] SUN B, LI Y, WANG Z L, et al. A combined physics of failure and Bayesian network reliability analysis method for complex electronic systems[J]. *Process Safety & Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B*, 2021, 148: 698-710.
- [9] SUN B, CAO Y T, FENG Q, et al. An archimedean copula function-based prediction method for high-power white LED considering multi-performance [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66 (8): 3405-3410.
- [10] 刘崇屹, 徐廷学, 付霖宇, 等. 基于多参数相关退化的导弹雷达导引头竞争失效状态预测[J]. *战术导弹技术*, 2020(1): 68-76.
- LIU CH Y, XU Y X, FU L Y, et al. Multi-parameter related degraded competition failure state prediction of missile radar seeker [J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(1): 68-76.
- [11] 骆明珠, 康锐. 基于故障物理的惯导电路可靠性预计新方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2013(6): 134-139.
- LUO M ZH, KANG R. Approach to reliability prediction of inertial navigation circuits based on physics of failure[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013 (6): 134-139.
- [12] 郭来小. IGBT 基于故障物理的失效分析及电子器件加速寿命模型的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- GUO L X. Failure analysis of IGBT based on physics of failure and study on accelerated life models of electronic devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [13] PECHT M, LALL P, WHELAN S J. Temperature dependence of microelectronic device failures [J]. *Quality & Reliability Engineering*, 2010, 6 (6): 275-284.
- [14] VARIN C, REID N, FIRTH D. An overview of composite likelihood methods [J]. *Statistica Sinica*, 2011, 21(1): 5-42.
- [15] 赵维涛, 李久安, 祁武超. 基于 Copula 函数及确定优化的结构可靠性评估[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(12): 196-201.
- ZHAO W T, LI J A, QI W CH. Structural reliability evaluation based on copula functions and deterministic optimization [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(12): 196-201.
- [16] IBRAHIM Y, ABDULKAREEM L I, MUHAMMAD A L, et al. Reliability modelling and analysis of client - server system using Gumbel - Hougaard family copula[J]. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 2021:1-14.
- [17] 袁莉芬, 朋张胜, 何恰刚. 基于 Copula 函数的光纤陀螺贮存可靠性评估[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(8): 58-65.
- YUAN L F, PENG ZH SH, HE Y G. Evaluating storage reliability of FOG based on Copula function[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(8): 58-65.
- [18] PALAYANGODA L K, NG H K T. Semiparametric and nonparametric evaluation of first-passage distribution of bivariate degradation processes [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021(205):1-7.
- [19] SUN B, LI Y, WANG Z, et al. Physics-of-failure and computer-aided simulation fusion approach with a software system for electronics reliability analysis [J]. *Maintenance and Reliability*, 2020, 22 (2): 340-351.
- [20] 王红军, 汪亮. 基于多域空间状态特征的高端装备运行可靠性评价[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4): 804-810.
- WANG H J, WANG L. High-end equipment operating reliability assessment based on multi-domain status space[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4): 804-810.
- [21] PAN G Z, LI X B, LUO Q, et al. A reliability evaluation of marine power electronic devices based on performance degradation data and a competitive failure model[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020(105): 67-70.

作者简介



宋常亮, 2005 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2011 年于南京理工大学获得硕士学位, 现为贵州航天电子科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为精确制导总体技术。

E-mail: 39643912@qq.com

Song Changliang received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2005, and M. Sc. degree from Nanjing University of Science & Technology in 2011. Now he is senior engineer in Guizhou Aerospace Electronic Technology Co., Ltd. His main research interest includes overall technology of precision guidance.



孙博(通信作者), 2007 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学可靠性工程研究所副研究员, 主要研究方向为可靠性系统工程、可靠性数字工程、故障物理仿真、预测与健康管理(PHM)等方面。

E-mail: sunbo@buaa.edu.cn

Sun Bo (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Beihang University in 2007. He is currently an assistant professor and a member of the Faculty of Systems Engineering at the School of Reliability and Systems Engineering at Beihang University in Beijing, China. His main research interests include reliability systems engineering, reliability digital engineering, physics of failure simulation, prognostics and health management (PHM).