

文章编号: 1001-9014(2010)03-0172-04

产品性能可靠性评估中的环境因子仿真研究

贾占强, 蔡金燕, 梁玉英, 韩春辉

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 环境数据综合方法是解决大型复杂电子产品性能可靠性评估中小子样问题的有效途径之一。而环境数据综合的关键在于确定各技术状态下的环境因子。现有的环境因子估计法存在估计精度低、物理建模难等问题, 因而限制了其工程应用。为此, 提出了一种基于电路仿真的环境因子估计法。该方法首先绘制出产品的 Pspice 电路原理图(相当于物理建模), 而后运用软件的瞬态分析、Monte-Carlo 分析和温度分析获取各环境状态下的性能仿真数据, 再结合加速性能试验的有关理论, 即可实现任意环境下环境因子的估计。最后, 以某型装备上的稳压电源为例说明了该方法的有效性和实用性。

关键词: 性能可靠性; 环境因子; 电路仿真; 加速退化试验

中图分类号: TB302 **文献标识码:** A

SIMULATION OF ENVIRONMENTAL FACTORS FOR PERFORMANCE RELIABILITY ESTIMATION

JIA Zhan-Qiang, CAI Jin-Yan, LIANG Yu-Ying, HAN Chun-Hui

(Department of Optics and Electrics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Environmental data synthesis method is one of the effective ways to solve small sample performance reliability estimation problem for complex electronic equipments. The most important part of this method is how to estimate the environmental factors. However, the existing estimation methods have the shortage of lower estimation precision and more difficulty in modeling. In view of these situations, an evaluation method for environmental factors based on circuit simulation was proposed. Firstly, the Pspice schematic of equipment (i. e. the physics modeling of equipment) was protracted. Then, the transient analysis, Monte-Carlo analysis and temperature analysis of Pspice software were used to attain the performance simulation data. Thirdly, environmental factors can be acquired for discretional environment situations by combining with the related theory of accelerated performance testing. Finally, an example of steady voltage power was provided and the validity and practicability of the proposed method were confirmed.

Key words: performance reliability; environmental factor; circuit simulation; accelerated degradation testing

引言

随着电子产品性能指标要求的日益提高, 如何在产品研制定型阶段准确地评价其性能水平显得日益紧迫。而现代电子产品的性能试验具有小样本、多试验环境等特点, 这为产品的性能可靠性评估带来很大的困难。解决这一难题的思路是采用环境数据综合方法实现各试验环境下的数据折算, 从而达到扩大评估样本量的目的, 而实现这一目的的关键在于确定产品的环境因子^[1]。

近年来出现了很多环境因子的评估方法, 例如,

刘琦^[2]等人基于 Bayes 理论得出了环境因子的 Bayes 估计模型, 但其在环境因子先验分布的选择上存在较大的主观性, 容易引起争议。张志华提出了基于物理模型的环境因子仿真估计法^[3], 该方法通过建立产品性能参数指标与环境因素的物理模型, 实现了环境因子的估计。其缺点是各种环境因素对产品性能参数影响的物理模型并不是唯一的, 且建立这个物理模型是十分困难的。

本文针对上述文献中的不足, 提出了一种基于电路仿真的环境因子仿真估计法。在充分利用 Pspice 仿真软件瞬态分析、Monte-Carlo 分析和温度

收稿日期: 2009-04-19, 修回日期: 2009-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(60472009); 军队科研项目

作者简介: 贾占强(1982-), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事武器系统性能检测与故障诊断, E-mail: jiazhanqiang@163.com.

Received date: 2009-04-19, revised date: 2009-12-31

分析的基础上,结合加速性能试验的相关理论,建立了环境因子的仿真模型.该方法根据产品的电路原理图,通过设定元器件的容差实现性能数据的随机仿真,从而提高了环境因子的评估精度.此外,该仿真评估方法不涉及复杂的物理建模,因此,在工程实践过程中更加高效和实用.最后,本文以一个简单实例,说明了该方法的应用过程.

1 环境因子

1.1 基本概念

传统环境因子的概念均是基于失效时间的^[4],而性能可靠性评估中的环境因子反映的是不同试验环境对产品性能影响度,利用它可以将各个试验环境下的性能试验数据进行折算,那么环境因子可定义为

$$E = X/Y. \quad (1)$$

对于受到多种随机因素影响的产品性能参数,通常认为其服从正态分布.在环境条件 A 下,有 $X \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$;在环境条件 B 下,有 $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$,这里, X, Y 分别表示在环境 A 和 B 下所考察产品同一性能参数的随机变量, $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ 分别为它们的均值和方差.定义环境 A 和环境 B 下的环境因子为 (K, b) ^[5]

$$K = \sigma_x/\sigma_y, b = \mu_x - K\mu_y, \quad (2)$$

K 为伸缩因子, b 为平移因子.式(2)中的 μ 和 σ 可用下式进行估计:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i, \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \mu)^2, \quad (3)$$

其中, p_1, p_2, \dots, p_n 为某一环境下的性能试验数据.

1.2 环境因子的估计

为了估计任意环境之间的环境因子,可以借助产品性能参数均值和方差的加速模型,利用式(2)得到环境因子的估计模型.

目前常用的性能加速模型^[6]主要有:1) Arrhenius 模型, $\mu = \exp(a + b/T), \sigma = \exp(a + b/T)$; 2) 逆幂律模型, $\mu = aS^b, \sigma = cS^d$; 3) Eyring 模型, $\mu = a \exp(b/T) S^c, \sigma = d \exp(e/T) S^f$. 模型中的参数估计可以通过最小二乘法实现.

2 环境因子仿真估计

2.1 仿真原理及步骤

随着集成电路与计算机的迅速发展,以计算机辅助设计(computer aided design, CAD)为基础的电子设计自动化(electronic design automation,

EDA)技术已经成为电子学领域的重要学科,并广泛应用于产品的设计阶段,同时这也为产品的性能评估及环境因子估计提供了一条新的途径.目前,作为电子电路 CAD 中成熟工具 Pspice 在产品的设计过程中得到了广泛的应用,因此,可以借助 Pspice 仿真软件对产品性能进行仿真,这样便避免了文献[3]中建立产品物理模型的困难.其基本原理如下所示.

假设产品的性能指标 P , 它受 $a_1, a_2, \dots, a_k, b_1, b_2, \dots, b_l$ 等多种因素的影响,其中 a_1, a_2, \dots, a_k 为随环境变化的因素, b_1, b_2, \dots, b_l 为不随环境变化的因素.则假设性能指标与这些影响因素的物理模型为

$$P = f(a_1, a_2, \dots, a_k, b_1, b_2, \dots, b_l). \quad (4)$$

在电路仿真分析中,这些影响因素是器件模型参数,例如:双极型晶体管模型中关键的模型参数饱和电流 IS, B-E 结泄露饱和电流 ISE, 正向电流增益 BF 等,结型二极管模型中的饱和电流 IS 和二极管等效电容 CD 等.

在 Pspice 中只需绘出产品的电原理图,并设定电路中各器件的关键模型参数的容差,就相当于建立了产品的性能指标 P 与其影响因素 $a_1, a_2, \dots, a_k, b_1, b_2, \dots, b_l$ 之间的物理模型.在绘制完产品的电原理图后,即可对环境因子进行仿真,具体仿真步骤如下.

Step 1 在 Pspice 中绘制电路原理图,并设定各个器件的容差范围;

Step 2 选择 L 个试验环境,在 Pspice 的 Monte-Carlo 分析模块中设定运行次数 $N(1 < N \leq 400)$,对电路进行瞬态特性分析(transient analysis),得到各个环境下电路输出端瞬态响应的 N 个模拟值 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}_l$,而后利用式(3)计算各个环境下的 $\{\mu_x, \sigma_x^2\}_l, l = 1, 2, \dots, L$;

Step 3 选择合适的性能加速模型,采用最小二乘法对性能加速模型参数进行估计,得到相应环境下的性能加速模型;

Step 4 由式(2)计算得到任意两环境之间的环境因子模型 (K, b) .

由于仿真试验是完全基于电路原理的,从而较真实地反映了产品的实际工作状态,但这里需要注意的是,在得到某一环境下的仿真数据后,需要对数据的正态性进行检验.

2.2 仿真数据的正态性检验

设产品在环境 A 下进行了 n 次性能仿真试验,

其仿真结果为 p_1, p_2, \dots, p_n , 而后对仿真结果进行排序, 得到 $P_1 \leq P_2 \leq \dots \leq P_n$. 由正态分布的分布函数可知

$$F(P_i) = \Phi[(P_i - \mu)/\sigma] \quad (5)$$

且令

$$F(P_i) = \Phi(Z_i) \quad (6)$$

进而可得

$$P_i = \mu + \sigma Z_i \quad (7)$$

式中, Z_i 是标准正态分布的下侧分位数.

文献[7]指出对于性能试验数据的次序统计量 $P_1 \leq P_2 \leq \dots \leq P_n$, 其中任一统计量 P_i 的分布函数 $F(P_i)$ 的中位数称为中位秩(分布函数为 0.5 时的分位数), 根据 β 分布函数有

$$I_q(i, n - i + 1) = 0.5 \quad (8)$$

式中, $I_q(i, n - i + 1) = 0.5$ 为不完全 β 分布函数. 给定样本量 n , 由式(8)计算分位数 q 即可求得中位秩 ($i = 1, 2, \dots, n$).

而后再由 $F(P_i)$ 求正态分布分位数 Z_i , 如果能试验数据服从正态分布, 则 $\{Z_i, P_i\}$ 成线性关系, 两变量线性相关的程度可用相关系数 r 表示为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(Z_i - \bar{Z}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}_i)^2}} \quad (9)$$

相关系数 r 定量描述了仿真数据服从正态分布的优劣, r 越趋近于 1, 说明性能数据对正态分布的拟合程度越高.

3 实例分析

串联调整式线性稳压电源, 自身具有过流保护功能, 可供现代电子装备各系统使用. 本文以某型装备上的 12V 稳压电源为例, 说明本文方法的应用过程. 该稳压电源的电路原理图如图 1 所示.

1) 选择仿真试验环境为 300K(标准温度), 303, 313, 323, 333, 343, 353, 363, 373, 383, 393 和 403K.

2) 电源的输出电压受到元器件参数容差或参数漂移的影响, 在电原理图中设定好各元器件关键参数, 即建立起性能指标与影响因素的模型

$$P = f(C_a, D_a, Q_a, R_a, C_b, D_b, Q_b, R_b) \quad (10)$$

其中, C_a, D_a, Q_a, R_a 分别代表电容、二极管、三极管和电阻等随温度变化的参数; C_b, D_b, Q_b, R_b 分别代表电容、二极管、三极管和电阻等不随温度变化的参数.

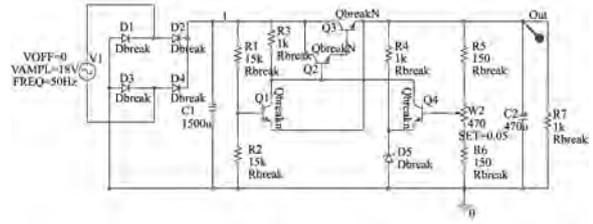


图 1 12V 稳压电源的路电原理图

Fig. 1 Circuit schematic diagram of 12V steady voltage power

表 1 各温度条件下 Monte-Carlo 分析结果

Table 1 Monte-Carlo analysis results at each temperature

温度 (K)	均值	方差	相关系数 r
300	12.0109	3.5987×10^{-3}	0.9978
303	11.9981	3.6357×10^{-3}	0.9977
313	11.9568	3.7825×10^{-3}	0.9974
323	11.9154	3.8802×10^{-3}	0.9977
333	11.8739	3.9995×10^{-3}	0.9979
343	11.8325	4.1241×10^{-3}	0.9973
353	11.7908	4.1970×10^{-3}	0.9976
363	11.7491	4.3294×10^{-3}	0.9974
373	11.7074	4.4154×10^{-3}	0.9974
383	11.6658	4.5617×10^{-3}	0.9974
393	11.6240	4.6490×10^{-3}	0.9973
403	11.5821	4.7736×10^{-3}	0.9971

3) 按照电路的设计要求设定好元器件关键参数的容差, 再利用 Pspice 中的 Monte-Carlo 分析模块和温度扫描模块在各温度条件下对输出端电压 V_{out} 进行扫描, 取 $N = M = 400$ (Monte-Carlo 分析模块扫描次数的最大值), 而后计算各温度条件下仿真数据的均值和方差, 如表 1 所示. 之后按照 2.2 中的方法对试验数据的正态性进行检验, 图 2 是对仿真数据服从正态分布的检验效果图, 可以看出数据基本分布在一条直线上, 并且各环境下的相关系数 r (如表 1 第 4 列所示) 非常接近于 1, 这都说明了仿真数据服从正态分布.

4) 由于本仿真试验是在温度条件作用下的仿真, 故选择 Arrhenius 模型作为性能加速模型, 利用最小二乘法及表 1 中各温度条件下性能参数均值和方差的仿真数据对模型参数进行估计, 得到该稳压电源的性能参数加速模型为:

$$\begin{aligned} \mu &= \exp(2.3468 + 42.1309/T) \\ \sigma &= \exp(-4.5459 - 324.5808/T) \end{aligned} \quad (11)$$

给定任意两温度环境 T_x 和 T_y , 由式(11)及式(2)可以得到环境因子的表达式为:

$$\begin{aligned} K &= \exp(324.5808/T_y - 324.5808/T_x) \\ b &= \exp(2.3468 + 42.1309/T_x) \\ &\quad - \exp(2.3468 - 324.5808/T_x + 366.7117/T_y) \end{aligned} \quad (12)$$

$$- \exp(2.3468 - 324.5808/T_x + 366.7117/T_y) \quad (13)$$

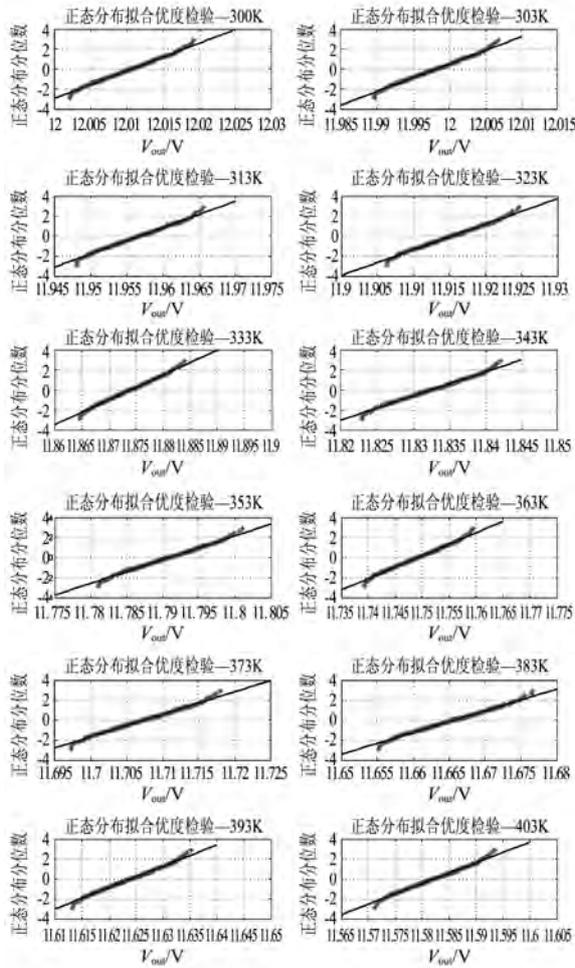


图2 仿真数据分布假设检验图
Fig.2 Distribution hypothesis testing plots for simulation data

利用式(12)、(13)即可实现任意温度条件下性能试验数据的折算.任意两温度条件下的环境因子变化规律如图3所示.

4 结论

本文提出的环境因子仿真估计法实际上是利用 Pspice 软件建立起电子产品性能指标随元器件参数变化的模型,而后通过温度扫描和 Monte-Carlo 扫描并借助加速性能试验的相关理论实现了任意环境下环境因子的估计,与建立复杂的电路功能模型相比,该方法更加简单实用,且易于工程实现.同时也为任意环境下性能试验数据的折算,扩大试验样本量,提高性能可靠性的评估精度奠定了坚实的基础.

REFERENCES

[1] PAN Ji-An. *Reliability, maintainability and availability assessment handbook*[M]. Beijing: National defense industry

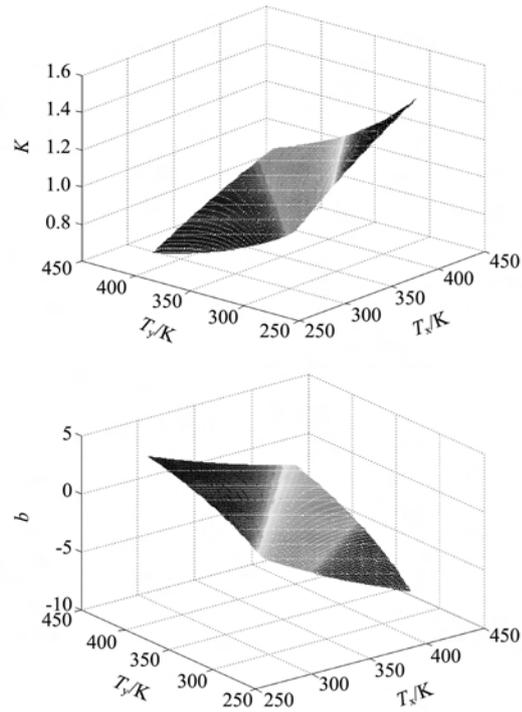


图3 任意环境之间的环境因子
Fig.3 Environment Factors between two environments

press(潘吉安.可靠性维修性可用性评估手册.北京:国防工业出版社),1995:60—65.
[2] LIU Qi, FENG Jing, ZHOU Jing-Lun. The Bayes analysis for liquid rocket engine performance reliability[J]. *Chinese Space Science and Technology*, (刘琦,冯静,周经伦.火箭发动机性能可靠性的 Bayes 分析.中国空间科学技术), 2003(6):46—51.
[3] ZHANG Zhi-Hua, LI Qing-Min, TIAN Yan-Mei. Reliability evaluating method of small-sample in multi-technical states by simulation[J]. *Journal of System Simulation* (张志华,李庆民,田燕梅.小样本多技术状态性能可靠性的仿真评估方法.系统仿真学报),2007,19(2):417—420.
[4] HU Bin. The definition and research status of environmental factor[J]. *Information and Electronic Engineering* (胡斌.环境因子的定义及现状研究.信息与电子工程),2003,1(1):88—92.
[5] LIU Lai-Long. Methods discussing of reliability evaluation of the canister's inner ballistic functional parameters [J]. *Ship Science and Technology*(刘来龙.发射筒内弹道性能参数可靠性评估方法探讨.舰船科学技术),2003,25(2):31—33.
[6] DENG Ai-Min. Research on reliability technology of high-reliability and long-lifetime products[D]. Changsha: National University of Defense Technology(邓爱民.高可靠长寿命产品可靠性技术研究.长沙:国防科学技术大学),2006:51—72.
[7] JIN Xing. *Reliability data calculation and application*[M]. Beijing: National defense industry press(金星.可靠性数据计算及应用.北京:国防工业出版社),2003:105—106.