

航空航天装备

航空电子设备加速可靠性试验 有限元分析应用进展

张鑫^{1,2}, 韩建立¹, 张信明², 刘建民²

(1.海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2.91614 部队, 辽宁 大连 116044)

摘要: 通过综述有限元分析在加速可靠性试验中的最新应用成果, 分析了航空电子设备加速可靠性试验技术的基本现状和存在的挑战。主要从航空电子设备可靠性试验现状、有限元理论基本概念和应用方法以及有限元在电子设备可靠性试验的工程运用现状等方面进行了综述分析。首先对有限元理论的基本概念、原理和主要应用方法进行了阐述。其次, 结合有限元分析在航空电子设备加速可靠性试验的应用研究现状, 总结了其优缺点。研究发现, 有限元分析能较好地解决航空电子设备加速可靠性试验中试验成本高、操作复杂的问题, 可以较好地完成对加速可靠性试验的仿真模拟。最后对有限元分析应用于航空电子设备加速可靠性试验的研究方向进行了展望, 提出了将有限元分析与传统可靠性理论相结合的几点研究思路, 为未来航空电子设备加速可靠性试验方法提供整体发展思路与建议。

关键词: 航空电子设备; 有限元分析; 加速可靠性试验; 仿真试验

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0027-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.005

Progress in Finite Element Analysis of Accelerated Reliability Test for Avionics

ZHANG Xin^{1,2}, HAN Jian-li¹, ZHANG Xin-ming², LIU Jian-min²

(1.Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2.The 91614th Unit of PLA, Dalian 116044, China)

ABSTRACT: Through reviewing the latest applications of finite element analysis in accelerated reliability test results, this paper mainly analyzes the basic situation of avionics accelerated reliability test technology and the existing challenges, from the aspects of aviation electronic equipment reliability test present situation, the basic concept and application of finite element theory and finite element method in engineering application status quo of electronic equipment reliability test, etc. First of all, the paper expounds the basic concept of finite element theory, the principles and the main application methods. Secondly, combining with the finite element analysis in avionics accelerated reliability test application research status quo, the paper sums up the advantages and disadvantages, the study found that the finite element analysis can well solve the problems of high cost, complex

收稿日期: 2021-06-21; 修订日期: 2021-08-03

Received: 2021-06-21; Revised: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51605487)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51605487)

作者简介: 张鑫 (1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为装备可靠性试验与评估。

Biography: ZHANG Xin (1993—), Male, Master, Research focus: equipment reliability test and evaluation.

通讯作者: 韩建立 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为海军航空导弹装备综合保障。

Corresponding author: HAN Jian-li (1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: comprehensive support of naval aviation missile equipment.

引文格式: 张鑫, 韩建立, 张信明, 等. 航空电子设备加速可靠性试验有限元分析应用进展[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 027-034.

ZHANG Xin, HAN Jian-li, ZHANG Xin-ming, et al. Progress in finite element analysis of accelerated reliability test for avionics[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 027-034.

operation in the avionics accelerated reliability test, and can better help simulation of accelerated reliability test; Finally, the research direction of the application of finite element analysis in the accelerated reliability test of avionics is prospected, and several research ideas of combining finite element analysis with traditional reliability theory are put forward, and it provides the overall development ideas and Suggestions for the accelerated reliability test method of avionics in the future.

KEY WORDS: avionics; finite element analysis; accelerated reliability test; simulation test

航空电子设备包括机载或弹载的通信、导航、仪表及自动控制系统设备与部件,其研究通常具备以下特点:1)为保证研究价值和意义,目标对象通常为现役产品,可获取样本少,样本获取途径难;2)电子设备自身制造成本高,可替代产品少,属于典型高价值电子设备。随着电子设备更新换代速度加快,也对航空电子设备加速可靠性试验提出了高效性、经济性的要求。与此同时,各类科研机构对各类产品可靠性信息的需求也促进了针对加速可靠性试验技术的探索。因此,越来越多的学者探索将仿真分析手段应用于加速可靠性试验的研究中,其中基于有限元分析的仿真试验方法因为其在物理学、热传导、结构力学、断裂力学和材料力学等领域展示出的实用性和有效性引起了从事可靠性研究学者的兴趣,并在一些产品的可靠性相关试验中取得了应用。

最近几年在材料级的研究中,北京工业大学吴奇^[1]将有限元分析应用于某型号铝合金焊接接头拉伸试验以及母材的热循环过程中,通过建立基于温度、温度历史及应变强化效应的接头可靠性模型和对焊接接头残余应力的有限元模拟值进行对比,验证了接头可靠性模型的有效性。西北工业大学魏坤龙等^[2]为研究三维编织复合材料单轴拉伸渐进损伤与失效强度,考虑了材料内部结构,建立了复合材料单胞有限元模型,通过探究其损伤演化规律,采用有限元法结合周期性边界条件模拟了材料细观损伤起始、演化与失效过程,并成功预测了材料轴向拉伸强度。在器件级的研究中,哈尔滨工业大学田茹玉^[3]将有限元分析应用于某电子器件极限条件下的焊点可靠性分析,通过有限元建模分析陶瓷球栅阵列焊点在热冲击载荷下的应力应变分布规律,基于疲劳失效模型,预测了焊点疲劳寿命。华北电力大学邓二平^[4]为研究IGBT器件内部的压力分布情况,运用有限元计算模型对器件的结构功能进行了分析,探讨了组件加工误差以及器件布局设计和压力分布之间的关系。国防科技大学袁杰红^[5]设计了基于有限元分析的弹箭连接机构准静载加载试验的仿真试验,在仿真试验过程中,模拟了准静载荷载作用下箭弹连接结构的失效机理,并通过和实际试验作对比,验证了有限元模型的正确性。

以上成果表明,有限元分析能够较好地应用于可靠性试验及相关领域的研究中,因此探索基于有限元分析的航空电子设备加速可靠性试验方法应该具有

良好的可行性。文中主要从航空电子设备可靠性试验现状、有限元理论基本概念和应用方法以及有限元在电子设备可靠性试验的工程运用现状等方面进行了综述分析,为开展基于有限元技术开展电子设备可靠性试验的研究,提供整体发展思路与建议。

1 航空电子设备加速可靠性试验分析

1.1 目的及类型

加速可靠性试验即采用加速应力的可靠性试验,在电子设备研制和生产过程中是完善设计、评估性能的必要手段,主要目的包括发现产品设计、材料工艺方面的缺陷,评估产品可靠性水平以及获取产品的故障信息。此外,结合统计学手段,还可以获取产品在应力作用下的响应特征、产品薄弱环节和产品性能变化趋势等,使人们更全面掌握电子设备的可靠性信息,从而有助于电子设备的使用、维修以及后续的改进^[6]。

目前正在研究和应用于电子设备的加速可靠性试验按照试验场地、应力施加原则、应用阶段、试验目的等可分为很多种类。比如按试验场地不同,将可靠性试验分为实验室可靠性试验和现场可靠性试验^[7]。在文中主要探讨的实验室试验中,比较有代表性的有可靠性强化试验(Reliability Enhancement Testing, RET)^[8]、高加速寿命试验(Highly Accelerated Life Testing, HALT)^[9]、加速寿命试验(Accelerated Life Testing, ALT)^[10-11]、高加速应力筛选(Highly Accelerated Stress Screening, HASS)^[12]、高加速应力试验(Highly Accelerated Stress Testing, HAST)^[13]等。在进行加速可靠性试验时,为快速获取产品可靠性信息,一般采用加速应力的方式进行试验。为避免产品失效机理发生改变,一方面需合理确定加速应力范围;另一方面,需要了解产品在任务剖面中所受应力类型与其失效机理的关系。

1.2 航空电子设备敏感应力与失效机理

加速可靠性试验为缩短试验时间和保证加速速率,一般会在满足工作极限范围前提下,采取足够高的加速应力,对航空电子设备性能状态的影响较大。因此,不管是选择单一应力、组合应力还是综合应力,应力类型应基于设备主要故障模式和故障机理,且试验应力水平不应改变设备的失效机理。

根据美国空军航空电子系统工程研究数据表明，温度和振动在导致电子设备失效的环境因素中占比达到 55%和 20%^[14]（见图 1）。因此，针对电子设备的加速可靠性试验中，应力类型选择以温度和振动为主。

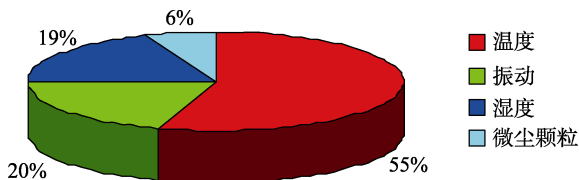


图 1 航空电子设备失效因素
Fig.1 Failure factors of electronics

根据资料显示，电子设备在温度循环和振动环境下的主要失效机理为疲劳失效^[15]。另据贝尔实验室和 IBM 公司对电子产品的疲劳分析研究发现，电子产品的不合理结构设计、元器件质量和生产工艺水平也会

成为引发产品失效的因素^[16]。以某型号航空电子设备典型部件为例，其中包含电感、电容、电阻、二极管等多种类型电子元器件，元器件的装配方式包括了焊接、封装和表面粘贴，研究其在温度与振动应力作用下的失效模式与失效机理汇总见表 1。

根据以上研究分析，针对航空电子设备的加速可靠性试验可以得出以下结论：

- 1) 设备在任务剖面中的性能主要受温度和振动的影响，因此目前围绕电子设备的可靠性试验应当以温度和振动应力为主。在这两种应力作用下，电子设备会因为元器件的性能退化而产生退化失效或突发失效。
- 2) 从设备整体层面来看，产品在生产设计过程中的工艺水平、构造设计也会成为引发失效的原因。主要表现在由于材料热膨胀系数不一，导致温度变化过程中元器件、焊点或装配连接处产生应力集中，从而引发失效。

表 1 温度和振动应力作用下航空电子设备典型失效模式与失效机理
Tab.1 Typical failure modes and failure mechanism of avionics under the action of temperature and vibration stress

敏感应力	主要失效模式	失效机理
振动	元器件脱落或相对位移	振动超出装配工艺强度极限
	元器件失效	应力集中导致元器件疲劳破坏
	焊点脱落	塑性应变积累
温度	元器件相对位移	不同材料热胀冷缩程度不一
	元器件性能退化或失效	温度导致元器件性能改变，高温加速老化
	焊点脱落	结构体随温度变化而发生形变
	元器件或电源板破裂	低温导致材料变硬、变脆

1.3 加速可靠性试验需要解决的问题

工程领域中，为提高电子设备的可靠性，各类可靠性试验广泛应用于产品的设计、研发以及后期维修使用的各个阶段。另外，对各类电子设备的应用需求也刺激了其研发设计工作，使得可靠性试验不仅仅存在于以往的研发设计部门和高水平实验室，众多的企业、院校甚至产品使用单位也需要依靠可靠性试验获取产品的各类可靠性信息。然而相比较广泛的需求，可靠性试验面临的困难和挑战也显现出来，亟需克服。

1) 试验成本问题。与研发设计部门的可靠性试验不同，一些以评估或验证为目的开展的可靠性试验在面对诸如以军用、航天等高价电子设备为对象时，会受到试验成本的制约。尤其是电子设备，在可靠性试验过程中，持续或间歇性受到加速应力的作用，可能引发的失效及造成的累积损伤也会带来不小的风险成本。比如以产品失效为研究目的的高加速寿命试验和以失效统计为研究目的的加速寿命试验，更是需要以产品的破坏失效为代价取得试验数据。如果

试验对象为高价值电子设备，对资金支持不足的研究机构来说，实操试验的巨大成本会制约研究的开展。如前文所述，航空电子设备因为其高价值、小样本的产品特点，在面对试验成本问题时，矛盾尤为突出。

2) 试验操作问题。针对电子设备的可靠性试验，需要实验室具备相应的设备和条件。以目前广泛运用与寻找电子设备潜在故障并改善可靠性的可靠性强化试验为例，就需要依赖于提供较大温变速率和振动频率的可靠性强化试验箱，对温控范围、应力误差范围都有较高的要求，而能够满足试验要求的设备目前主要由美国 QualMark 公司生产^[17]。此外，不论是研究产品失效而给出的失效判据，还是研究产品性能随某种应力的变化，试验过程中都会涉及对电子设备性能的测试。简单如电压、电流的获取，复杂的还有涉及检波滤波、信号输出、工作频率等参数的测量，在施加温度或震动应力的同时，对电子设备性能参数进行测量，对设备安装、实验室条件和人员素质都存在一定的风险和难度。为解决电子设备加速可靠性试验中存在的困难，很多学者寻求基于有限元理论的仿真试验方法来模拟电子设备可靠性试验的过程。

2 有限元理论在加速可靠性试验的应用思路

2.1 有限元基本原理

有限元法 (Finite Element Method) 是求解微分方程的一种非常有效的数值分析方法,最早应用于 20 世纪 50 年代航空制造工程的飞机结构矩阵分析中^[18]。其基本的原理是将一个结构分解为有限个力学小单元,对每一单元假定一个较简单的近似解,然后求解其满足条件,从而得到最终问题的解。在求解过程中,用分片函数去逼近原函数,把无限自由度问题转化为有限自由度的问题,再求解一个线性方程组,得到原方程的近似解,通过不断缩小满足问题收敛要求的单元尺寸,并增加求解区域内单元的数目,会得到不断趋向精确的解,它是用较简单的问题代替复杂问题后再求解思想的产物^[19]。虽然应用有限元法求得的解是近似解,但大多数情况下实际问题是难以得到准确解的。相比较而言,有限元不仅可以求解复杂形状的目标,而且计算精度相对较高,因而在几十年内不断有学者将其应用于新的领域,至今其应用范围已经由机械结构问题扩展到了弹性力学乃至塑性力学问题,由求解平面问题扩展到三维立体空间问题,由简单静力学问题扩展到复杂动力学问题,并在固体力学、流体力学、热力学和电磁学问题等领域也展示出较好的适应性,成为一种应用广泛并且实用高效的数值分析方法^[20-22]。

计算机技术的进步更加提高了有限元分析的计算效率,使其在电子设备加速可靠性试验中取得了广泛应用。根据有限元的基本原理,可以通过仿真分析软件对电子设备进行三维建模,将研究对象离散化为一个与原结构近似的数学模型,经过一定的步骤实现对设备内部应力、应变和产生的位移等参数的求解,达到模拟设备在不同可靠性试验方案下状态变化的目的。目前主流的几款有限元分析软件主要有 ANSYS、ABAQUS、LS-DYNA、DYTRAN、ADINA、Nastran 和 MARC 等,各种软件在针对不同类型的问题求解时也表现出不同的特点。其中 ANSYS 作为通用有限元分析软件,功能强大,操作简便,因此广受好评。在中国有一百多所院校将 ANSYS 软件作为进行有限元分析的标准教学软件,并广泛运用于电子产品温度和振动分析中^[23]。

2.2 基于 ANSYS 的有限元分析应用思路

根据木桶原理,产品的寿命往往取决于其薄弱环节,在加速寿命试验中,也常常根据这一原则开展试验分析,有限元理论可以与加速寿命试验相结合,通过分析产品在应力作用下的薄弱环节,找到产品易失效的危险位置。吕长志等^[24]将有限元分析应用于某机

载武器 DC/DC 电源模块的加速寿命试验失效机理研究,利用 ANSYS 软件对模块表面温度分布进行模拟,通过对模块可靠性的统计数据,得出影响其可靠性的关键器件为某型号效应晶体管和肖特基势垒二极管,是通过有限元分析与可靠性统计相结合获取部件薄弱环节的典型应用。在获取产品薄弱环节的基础上,通过有限元仿真试验中敏感应力作用下的试验件状态变化,与相应的加速失效模型结合,分析危险位置的加速寿命试验数据可以预估产品寿命,从而简化因产品结构复杂而带来的可靠性试验数据分析难题。例如张弦^[25]、马岩^[26]就建立了谐波减速器整机瞬态动力学有限元分析模型和某型号航天器精密组件的温度、振动有限元分析模型,准确预估了产品的疲劳失效寿命。

此外,可以通过有限元分析开展电子产品加速可靠性试验中的失效模式与失效机理研究,通过模拟产品在不同应力作用下的性能退化情况,分析各种应力对试验产品的影响程度,结合给定的阈值确定是否产生失效。如马喜宏^[27]以某型导弹弹载加速度计为研究对象,开展了基于 ANSYS 有限元分析软件的微加速度计封装结构加速应力环境下受力情况仿真试验,通过分析,证明了在弹载高速旋转环境下,加速度计的失效模式为疲劳失效与磨损失效,并排除了其他失效模式发生的可能。

在针对失效模式与失效机理比较明确的研究对象时,可以模拟试验产品在应力作用下的状态变化,通过结合已知失效模式下的产品状态,推导工作极限和寿命等可靠性数据。如彭勃^[28]以航空电子设备中常用的传导冷却高功率半导体激光器为对象,用有限元方法对激光器巴条互连界面在-55~125℃加速温度应力条件下的热失效行为进行了仿真模拟试验,提取了仿真试验过程中激光器随温度变化的应变数据,结合之前对互连界面结构在温度载荷条件下的失效机理研究,预测了不同位置 and 不同材料的互连界面在高低温交变条件下的寿命。陈星^[29]以广泛应用于导弹制导的某两种型号红外焦平面探测器为研究对象,用有限元方法分析比较了这两者在低温环境条件下的形变程度和热应力情况,并通过对产品失效形变程度的分析解释了模块断裂等可靠性问题。对一些具有复杂结构的电子产品,由于结构和形状等因素无法通过具体试验测量其内部工作状态变化的,也可以基于有限元分析来实现。如高成^[30]为解决某航空器电连接器在加速可靠性试验中内部温度难以准确测量的问题,设计了基于 ANSYS 的热电耦合仿真分析方案,利用 solidworks 软件建立电连接器的三维模型,对模型开展温度应力仿真试验,得到了电连接器在不同环境温度下的内部温升情况及温度分布规律,为确定电连接器在加速可靠性试验中的性能变化规律提供了依据。

通过以上应用成果的总结,可将有限元分析在可

可靠性试验仿真中的应用类型分为结构分析和温度分析^[31-32]两大类。前者主要针对振动应力状态下电子设备的应变分析, 后者主要分析温度应力的作用效果。其中结构分析类型又包括作用应力分析、模态分析、随机振动分析与跌落分析等 4 种; 温度分析类型又可分为温度场分析、温度循环分析和热应力分析。因此, 基于 ANSYS 软件有限元分析, 能够满足对航空电子设备振动、温度和温度循环应力试验的仿真模拟^[33]。

2.3 仿真试验方案设计思路

通过总结文献[18-33], 可以得到以 ANSYS 软件作为有限元分析手段的步骤, 一般可以分为前处理、求解和后处理 3 个阶段, 其具体步骤见图 2。

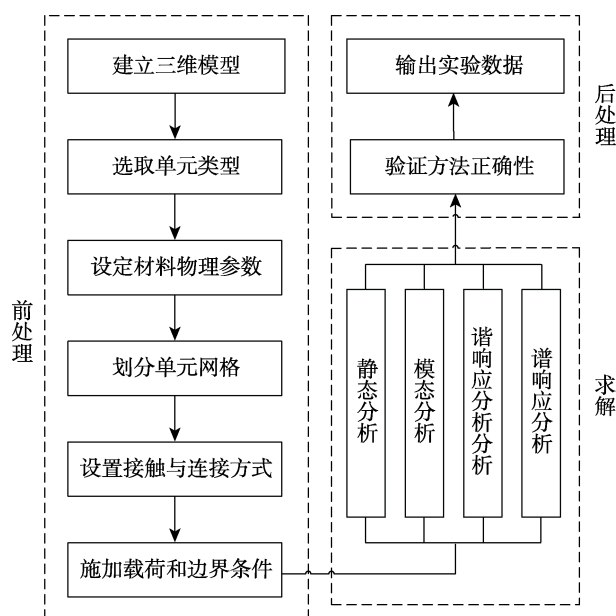


图 2 有限元仿真试验设计思路

Fig.2 Design idea of finite element simulation experiment

前处理需要对目标对象内部机构进行分析, 基于三维建模软件如 CAD、Solidworks、CATIA 等工程制图软件建立三维模型, 再通过接口导入 ANSYS 中, 选取有线体单元、板壳单元、实体单元和质量单元等合适的单元类型, 利用 ANSYS 软件模拟自由度约束、力、表面载荷、体积载荷、惯性载荷和耦合场载荷等 6 种载荷对物体的影响。在定义各种材料参数的前提下, 基于计算机语言, 按照试验方案要求, 将各种应力载荷施加于三维模型, 模型的位移边界条件则可保证分析结果的合理性。前处理是电子设备加速可靠性试验中有限元分析过程的最关键部分, 在前处理结束后, 可基于 ANSYS 设定的不同求解器求解分析结果。如果研究对象包括某些特定类型结构, 根据分析需要, 可以按照试验方案应力作用效果, 利用特殊求解工具直接选择不同分析类型。例如静态分析、模态分析、谐响应分析和谱响应分析等, 同时在计算机操作求解控制对话框时, 设定其他针对性分析选项, 满足

不同求解需求。求解结束要进行后处理, 主要是根据仿真分析的结论对仿真试验中设定的载荷是否有效、试验设计是否正确、网格划分是否合理等问题进行检查, 可以判定在一定失效模式范围内试验件是否失效, 输出需要的仿真试验可靠性试验数据等。

3 有限元仿真试验应用效果分析

从文中所述研究成果来看, 当前主要在 4 个方面 (材料选择、结构优化、工作特性和敏感应力影响因素分析) 采用有限元法分析航空电子设备加速可靠性试验, 可以实现振动和温度应力载荷下试验件状态性能的分析, 并结合可靠性相关理论, 发现生产设计中存在的薄弱环节。相比于实操试验, 基于有限元分析的仿真实验可操作性强, 试验成本低, 对于高成本、小样本的电子设备加速可靠性试验更具有应用价值。主要有以下优点。

1) 形象直观。基于有限元分析开展电子设备可靠性加速试验, 对目前试验中影响电子设备性能的振动和温度应力都有成熟的分析理论, 通过对电子设备材料结构的分析, 能方便地获取各类材料的物理性能参数, 借助计算机手段, 可较为真实地展现出电子设备在应力载荷作用下的状态响应。某航空电子设备组件在模拟不同环境应力下的试验温度分布如图 3 所示, 根据组件温度分布情况, 可以直观发现组件的薄弱环节。

2) 适应性强。基于有限元分析开展航空电子设备可靠性加速试验, 可以克服试验设备的制约, 对研究开展极限应力条件下的试验件状态提供了较为简单可行的手段。同时, 有限元仿真能比较真实地反映试验件在极限应力下可能出现的破坏失效, 克服了实操试验因为试验件损耗带来的额外成本和风险, 是一种可行性很强的仿真试验方法。

有限元理论作为一种仿真分析手段, 在应用于航空电子设备可靠性试验模拟与仿真时, 也会存在一定的局限性。首先, 有限元仿真无法模拟电子元器件内部的性能退化或损坏, 对于构造复杂、由数量巨大各类电子元器件构成的电子设备, 其可能产生的意外失效通过仿真手段是无法预知或获取的。因此, 在涉及产品寿命的问题上, 有限元仿真需要和可靠性理论相结合, 才能推导出产品的可靠性信息。另外, 有限元仿真分析依赖于对电子设备内部构造的精确掌握, 尤其是材料属性、结构布局等数据的真实性, 才能保证仿真试验的可信度, 对三维建模的工程应用水平也有较高的要求。

从当前的工程应用来看, 有限元分析在航空电子设备可靠性试验中验证了其有效性和可行性。总结有限元分析在航空电子设备可靠性试验中应用的优势和不足, 笔者认为, 未来还应加强有限元分析与传统

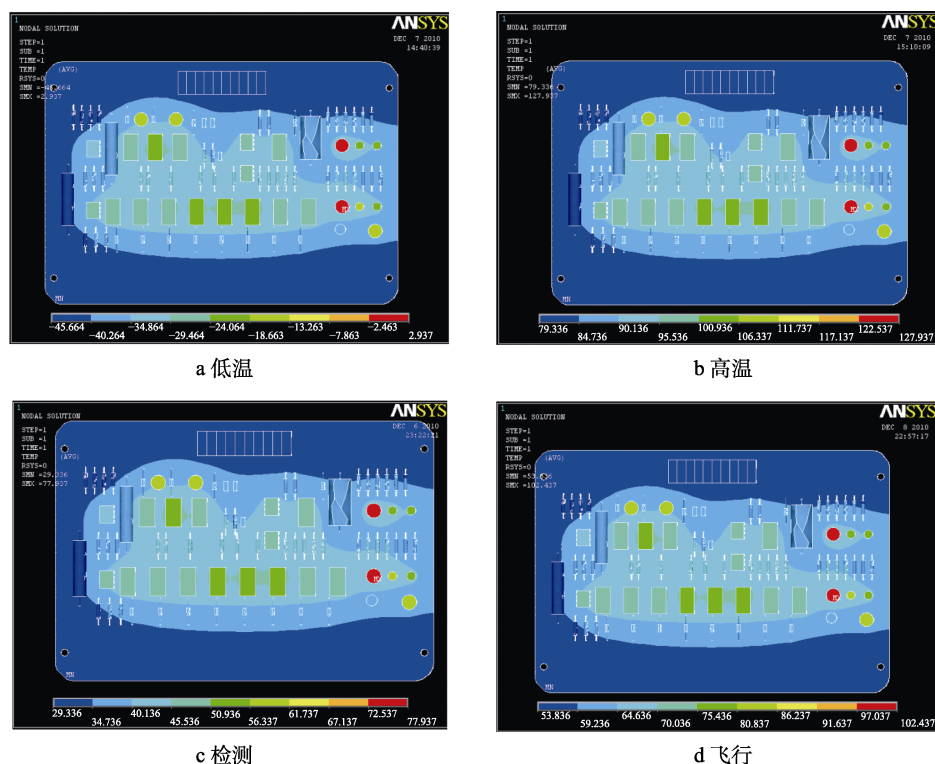


图3 航空电子设备组件温度分布

Fig.3 Temperature profile of avionics components: a) low temperature; b) high temperature; c) testing; d) flight

可靠性理论相结合的研究,具体方向有:

1) 研究有限元分析在综合应力作用下的仿真分析方法。通过与电子设备失效模式与失效机理分析方法相结合的手段,解决综合应力条件下竞争失效问题的模拟与仿真。

2) 研究有限元分析过程中网格划分的原则,分析模型各结构特征与加速可靠性试验应力的联系,指导构建更高效的网格划分机制,提升对模型特征利用效率,改善软件分析的运行速度和精度。

3) 研究基于可靠性模型的有限元分析,通过有限元分析,确定产品内部温度及等效应力分布情况。在确定薄弱环节的情况下,结合零部件失效分布模型和性能退化模型,开展试验件的寿命预测或失效统计分析。

4) 通过综述有限元分析在加速可靠性试验中的应用现状,发现研究对象主要以材料级和部件级为主,是否可以考虑开展整机级有限元分析值得未来探讨。

4 结论

针对近年国内外的相关文献和自身工程运用经验,分别综述了有限元分析在可靠性研究、加速可靠性试验以及航空电子设备加速可靠性试验中的最新应用成果,并结合航空电子设备加速可靠性试验的特点,通过总结介绍有限元理论的原理和应用的一般步骤,对于电子设备可靠性试验方案的设计和可靠性研

究都具有一定的参考意义。

1) 分析了电子设备加速可靠性试验中存在的困难和需要解决的问题,研究了现有成果中有限元分析应用于电子产品加速可靠性试验仿真模拟的主要技术方法,总结了仿真试验的设计思路,为如何基于有限元分析解决加速可靠性试验中的技术难题提供了借鉴参考。

2) 通过对现有文献成果的分析,对有限元仿真试验的应用效果进行了分析,总结了这种仿真试验方法的优缺点,认为有限元分析作为一种仿真试验手段应用于电子设备加速可靠性试验还存在着一定的局限性,许多问题有待于深入研究,比如三维模型的简化方法、电子元器件内部性能退化的检测等。总体来看,有限元分析应用于电子设备加速可靠性试验能帮助工程人员达到节约成本、便于操作的目的,并且根据有限元分析在加速可靠性试验的应用现状和短板形成了几点启示,为未来有限元分析的研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] 吴奇, 李晓延, 孙鲁阳, 等. 2219 铝合金焊接接头软化模型的建立与应用[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 10138-10143.
WU Qi, LI Xiao-yan, SUN Lu-yang, et al. Establishment and application of softening model of 2219 aluminum alloy welding joint[J]. Materials reports, 2020, 34(10):

- 10138-10143.
- [2] 魏坤龙, 史宏斌, 李江, 等. 考虑孔隙缺陷三维编织 C/C 复合材料渐进损伤及强度预测[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(4): 447-457.
WEI Kun-long, SHI Hong-bin, LI Jiang, et al. Progressive damage simulation and tensile strength prediction of three-dimensional braided C/C composites considering void defects full-text in English[J]. Journal of solid rocket technology, 2020, 43(4): 447-457.
- [3] 田茹玉, 王晨曦, 田艳红, 等. 极限温度下 CBGA 焊点热冲击疲劳寿命预测[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 93-97.
TIAN Ru-yu, WANG Chen-xi, TIAN Yan-hong, et al. Life prediction of CBGA soldered joints under extreme temperature thermal shock[J]. Transactions of the China welding institution, 2017, 38(10): 93-97.
- [4] 邓二平, 赵志斌, 张朋, 等. 压接型 IGBT 器件内部压力分布[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 201-208.
DENG Er-ping, ZHAO Zhi-bin, ZHANG Peng, et al. Clamping force distribution within press pack IGBTs[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2017, 32(6): 201-208.
- [5] 袁杰红, 田彤辉, 关振群, 等. 弹(箭)体级间连接结构准静载失效实验与数值预示[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(2): 107-113.
YUAN Jie-hong, TIAN Tong-hui, GUAN Zhen-qun, et al. Experimental and numerical prophetic study on the failure of the connection structure between stages of the missiles(rockets) under quasi-static load[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(2): 107-113.
- [6] 范志锋, 齐杏林, 雷彬. 加速可靠性试验综述[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 37-40.
FAN Zhi-feng, QI Xing-lin, LEI Bin. Review of accelerated reliability tests[J]. Equipment environmental engineering, 2008, 5(2): 37-40.
- [7] 祝耀昌. 可靠性试验及其发展综述[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(5): 261-269, 5.
ZHU Yao-chang. Reliability tests and their developments[J]. Spacecraft environment engineering, 2007, 24(5): 261-269, 5.
- [8] 陈铁牛, 吴昌, 王海波. 可靠性强化试验技术在空空导弹研制中的应用[J]. 航空兵器, 2015, 22(4): 39-43.
CHEN Tie-niu, WU Chang, WANG Hai-bo. Application of reliability enhancement test technology in the development of air-to-air missile[J]. Aero weaponry, 2015, 22(4): 39-43.
- [9] 晋李华, 刘中华. 微波组件产品高加速寿命试验综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(3): 69-73.
JIN Li-hua, LIU Zhong-hua. Review of HALT for microwave modules[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2017, 35(3): 69-73.
- [10] ISMAIL A A, AL-HARBI M M. Statistical inference of constant-stress partially accelerated life test model using failure-censored data from the linear failure rate distribution[J]. Strength of materials, 2019, 51(5): 786-792.
- [11] ISMAIL A A. Theoretical aspects of the development of partially accelerated life testing using Bayesian estimation[J]. International journal of fatigue, 2020, 134: 105459.
- [12] DONADEL J, MARTINS GOMES H. Fuzzy heuristic control of an electrodynamic shaker in accelerated HALT/HASS tests[J]. Ingeniare Revista chilena de ingeniería, 2019, 27(1): 101-112.
- [13] HUH S H. Lifetime predictions of printed circuit boards under biased HAST[J]. Journal of welding and joining, 2018, 36(2): 1-6.
- [14] 席运洋, 刘万远, 鲍华. 某型空空导弹电子部件加速贮存寿命试验方法研究[J]. 航空兵器, 2016, 23(1): 64-68.
XI Yun-yang, LIU Wan-yuan, BAO Hua. Testing method study of accelerated storage life for electronic components in certain air-to-air missile[J]. Aero weaponry, 2016, 23(1): 64-68.
- [15] 周光巍, 王丽丽. 空空导弹贮存寿命的可靠性论述[J]. 航空兵器, 2015, 22(4): 59-62.
ZHOU Guang-wei, WANG Li-li. Reliability discourse of the air-to-air missile storage life[J]. Aero weaponry, 2015, 22(4): 59-62.
- [16] 马存宝, 王彦文, 史浩山, 等. 机载电子设备 BIT 优化设计技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2276-2279.
MA Cun-bao, WANG Yan-wen, SHI Hao-shan, et al. Study on BIT optimization design of airborne electronic equipment[J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(9): 2276-2279.
- [17] 史晓雯, 徐剑峰, 徐丹. HALT 试验技术综述[J]. 环境技术, 2011, 34(3): 24-27.
SHI Xiao-wen, XU Jian-feng, XU Dan. Comprehensive review of HALT technology[J]. Environmental technology, 2011, 34(3): 24-27.
- [18] 常涛. 电子设备结构有限元精确建模方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
CHANG Tao. Research on precise finite element modeling method of electronic equipment structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [19] 刘文杰. 电路板组件环境应力筛选技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
LIU Wen-jie. Research on environmental stress screening technology of circuit board assembly[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [20] 付珊珊, 张宏杰, 诸嘉慧, 等. 新型高温超导复合导体的磁场仿真与实验分析[J]. 低温与超导, 2020, 48(4): 35-41.
FU Shan-shan, ZHANG Hong-jie, ZHU Jia-hui, et al. Magnetic field simulation and experimental analysis for novel HTS composite cable[J]. Cryogenics & superconductivity, 2020, 48(4): 35-41.

- [21] 李俊岩, 包婷萍, 侯鹏飞, 等. 基于有限元分析的螺纹连接强度设计技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(2): 78-82.
LI Jun-yan, BAO Ting-ping, HOU Peng-fei, et al. The research on design technology of thread connection strength based on finite element analysis[J]. Missiles and space vehicles, 2020(2): 78-82.
- [22] 姜楠, 张亮, 刘志权, 等. FCBGA 器件 SnAgCu 焊点的热冲击可靠性分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 39-42.
JIANG Nan, ZHANG Liang, LIU Zhi-quan, et al. Reliability analysis of thermal shock for SnAgCu solder joints of FCBGA devices[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 39-42.
- [23] 张才洪. ANSYS14.0 理论解析与工程应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
ZHANG Cai-hong. Theoretical analysis and engineering application of ANSYS14.0[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.
- [24] 吕长志, 马卫东, 谢雪松, 等. DC/DC 电源模块可靠性的研究[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(7): 890-895.
LYU Chang-zhi MA Wei-dong, XIE Xue-song, et al. Reliability of DC/DC power supply module[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7): 890-895.
- [25] 张弦, 姜歌东, 梅雪松, 等. 采用瞬态有限元及加速寿命试验的谐波减速器时变可靠度评估方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 1-9.
ZHANG Xian, JIANG Ge-dong, MEI Xue-song, et al. Time-dependent reliability evaluation method of harmonic drive with transient finite element and accelerated life test[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 1-9.
- [26] 马岩. 航天精密机电组件高加速筛选试验模拟与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
MA Yan. Highly accelerated stress screen modeling and simulation of aerospace precision electromechanical component[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [27] 马喜宏, 王威, 秦立君, 等. 高速旋转弹载加速度计失效分析[J]. 现代电子技术, 2018, 41(15): 114-118.
MA Xi-hong, WANG Wei, QIN Li-jun, et al. Failure analysis of high-speed rotating missile-borne micro-accelerometer[J]. Modern electronics technique, 2018, 41(15): 114-118.
- [28] 彭勃, 张普, 陈天奇, 等. 高功率半导体激光器互连界面可靠性研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 109-116.
PENG Bo, ZHANG Pu, CHEN Tian-qi, et al. Reliability of bonding interface in high power diode lasers[J]. Infrared and laser engineering, 2018, 47(11): 109-116.
- [29] 陈星, 何凯, 王建新, 等. 碲镉汞线列红外探测器模块温度循环的可靠性[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(4): 369-374.
CHEN Xing, HE Kai, WANG Jian-xin, et al. Thermal cycling reliability of linear HgCdTe infrared detectors[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2014, 33(4): 369-374.
- [30] 高成, 张芮, 黄姣英, 等. 高温环境下电连接器内部温度有限元仿真分析及试验[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1867-1872.
GAO Cheng, ZHANG Rui, HUANG Jiao-ying, et al. Finite element simulation analyses and tests on internal temperatures of electrical connectors under high temperatures[J]. China mechanical engineering, 2019, 30(15): 1867-1872.
- [31] 任超, 曾晨晖, 邵将, 等. SOP 器件的随机振动可靠性试验和有限元分析[J]. 半导体技术, 2014, 39(9): 714-718.
REN Chao, ZENG Chen-hui, SHAO Jiang, et al. Random vibration reliability experiment and finite element analysis for the SOP package[J]. Semiconductor technology, 2014, 39(9): 714-718.
- [32] 徐文正, 任超, 罗成, 等. 带引脚表贴器件互联疲劳寿命的有限元分析[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(12): 98-102.
XU Wen-zheng, REN Chao, LUO Cheng, et al. Finite element analysis on interconnection fatigue life of surface mounted components with lead[J]. Electronic components and materials, 2014, 33(12): 98-102.
- [33] 周嘉诚. 不同环境条件下电路板组件可靠性研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2018.
ZHOU Jia-cheng. Study on the reliability of the PCB assembly under different environmental condition[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2018.