

元器件应用验证技术及其工程实践

江理东¹,林立芳²,刘伟鑫²,王昆泰²,楼建设²,曾英廉²,王敬贤¹

(1.中国航天标准化与产品保证研究院,北京100141;2.上海精密计量测试研究所,上海201109)

摘要:应用验证是对国产元器件在上装应用前开展的一系列试验、评估和综合评价工作,评价元器件研制的成熟度和型号装备应用的适用度,以确定其在型号装备的可用度。本文对元器件应用验证的技术内涵、方法和平台、技术流程、关键技术及其与系统工程的关系等进行了分析研究。通过型号装备研制中的应用验证工程实践,剖析了对装备应用要求了解不足和理解不深、元器件研制技术未吃透、产品应用状态了解不足等在应用验证中发现的典型问题案例,提出了后续开展应用验证工作的建议。

关键词:应用验证;元器件;系统工程

中图分类号: TN 45; TN 712 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.021

Application Verification and Engineering Practice of Components

JIANG Lidong¹, LIN Lifang², LIU Weixin², WANG Kunshu², LOU Jianshe²,
ZENG Yinglian², WANG Jingxian¹

(1.China Academy of Aerospace Standardization and Product Assurance, Beijing 100141, China;

2.Shanghai Institute of Precision Measurement and Test, Shanghai 201109, China)

Abstract: Application verification is a series of tests, evaluations, and estimations for domestic components before application in equipment. It aims to evaluate the development maturity of a component and the adaptability of its equipment application so as to determine the availability of the component. In this paper, the technical connotations, methods, platforms, processes, and key techniques of application verification as well as its relationship with system engineering are analyzed. The typical problems found in the engineering practice of application verification, e. g., insufficient understanding of equipment application requirements, incomplete understanding of component development technology, and insufficient understanding of product application status, are analyzed, and some suggestions for future application verification are put forward.

Key words: application verification; component; system engineering

0 引言

航天科技实力是一个国家综合国力和战略威慑力的重要体现,是国家综合实力的重要标志之一,已成为事关国民经济、国防建设、人民生活的基础性和战略性产业。习近平总书记在首个中国航天日之时做出“探索浩瀚宇宙,发展航天事业,建设航天强国,是我们不懈追求的航天梦”的重要指示。微电子及其产品在航天工业体系中扮演着重要角色,通常是一代电路、一代整机、一代装备,当今世界航天强国都把元器件作为国家级战略技术资源。

长期以来,我国缺乏高端微电子芯片自主设计和实现能力,已成为制约我国信息产业发展的瓶颈。美国半导体和科技公司拥有50%左右全球市场份额,对华销量占全球市场份额六成。二战以来,西方发达国家始终对我国实施出口和技术转移的严格控制。1996年签订的《瓦森纳协定》几乎完全针对中国,包含两份出口控制清单:一是军民两用商品和技术清单,涵盖先进材料、电子器件、计算机、电信与信息安全、传感与激光等9大类技术和产品;二是军品清单,涵盖各类武器弹药、设备及作战平台等

收稿日期:2021-04-02;修回日期:2021-04-25

作者简介:江理东(1965—),男,硕士,研究员,主要研究方向为宇航元器件保证和管理。

22类技术和产品^[1-2]。21世纪以来,美国不断加强战略遏制、挑起贸易摩擦,2018年和2019年先后宣布对中兴和华为执行管制,禁止美国及使用美国技术的企业向其提供任何元器件、软件和设备。习近平总书记指出“当今世界面临两个大局、谋划工作要胸怀两个大局,一是中华民族伟大复兴的战略全局;二是世界百年未有之大变局”。这使我们深刻认识到伴随着中华民族的伟大复兴,我国和西方国家竞争将日趋激烈,美国对高新技术的出口管制将更加严厉,禁运核心关键高端产品将成为美国遏制我国航天产业、武器装备建设的重要手段。

近几年我国通过新品、型谱、核高基等渠道安排了一批核心军用电子元器件的研制。抗辐照32 bit SPARC V8微处理器、1553B总线控制器等一大批核心关键器件陆续完成研制,并在型号中实现应用。随着国产军用元器件技术水平的提升,军用元器件自主保障率逐步提高,国产元器件已成为军事装备应用的主体,但在应用中也暴露元器件固有和使用的问题。核心关键军用元器件受制于人的局面尚未得到根本扭转,特别是亿门级SRAM型现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、抗辐照高性能数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)、高带宽高精度运算放大器、高密度电连接器、大功率MOS管、高速高分辨率AD/DA和抗辐照大容量存储器等国内基础相对薄弱,仍需依赖进口。一方面,对部分元器件研制技术“未吃透”,产品定义实现、质量、可靠性风险大;另一方面,现有元器件信息数据难以充分指导用户使用,存在“不好用”“不会用”“用不好”“不愿意”等问题。

随着我国航天科技工业的快速发展,新型航天器和新一代运载器对配套元器件的性能、功能、质量可靠性和环境适应性提出了更高的要求。国产元器件研制和保证思路也由“满足产品规范及合同要求”逐渐向“确保产品耐应力裕度、提高宇航应用适应性、保证工程可靠应用”转变。因此,急需提高新研制元器件的技术成熟度和宇航应用适用度,并经充分验证和获取评价数据,得出明确评价结论并促进元器件成熟应用。

1 元器件应用验证的内涵及发展情况

1.1 技术内涵

应用验证是对元器件在应用于型号装备前开

展的一系列试验、评估和综合评价等工作,以确定元器件研制的成熟度和在型号装备中应用的适用度,经综合分析评价得出装备可用度或可用性结论,并形成应用指南,有效指导元器件产品成熟和合理应用。应用验证的主要目标是通过元器件的系统验证分析,尽早发现产品设计、制造缺陷和质量隐患等“不好用”问题,及时反馈研制单位进行改进、完善,促进产品成熟;通过对元器件的科学评价,为用户提供选用的依据,解决用户因应用支持数据缺乏、应用风险不明而决策困难的“不敢用”问题,促进元器件在宇航工程中推广应用;通过与用户的互动和发布应用指南,有效指导应用,解决用户选择错误、应用不合理等“用不好”问题,提高应用水平^[3-4]。

应用验证工作起源于宇航工程领域,一般分为3个阶段:元器件阶段、地面整机阶段和飞行阶段。元器件阶段是必选阶段,其目的是对元器件研制过程要素、固有质量和可靠性进行全面的验证和评价,针对宇航应用需求进行元器件功能、性能、特性和结构分析,获取极限性能数据,明确产品固有特性,确定研制成熟度;地面整机验证阶段是可选阶段,目的是对元器件在空间应用环境和应用系统中的适应性,进行全面的验证和评价,重点在宇航型号应用状态下的验证元器件与实际线路、系统及应用环境的匹配性,确定应用适应性;飞行阶段是备选阶段,一般考虑对使用新工艺、新材料、新技术的复杂元器件,且在应用系统中作用关键、需获取全面空间综合应力条件下验证数据的元器件进行飞行验证^[3-4]。

验证方式一般可分为元器件方式、板方式、系统方式和飞行方式。元器件方式主要指与应用状态不紧密关联的验证方式;板方式是指将元器件安装在特定的应用线路板上,并与应用状态紧密关联的验证方式;系统方式是指模拟和使用型号单机及系统应用状态的验证方式;飞行方式是使元器件处于在轨飞行状态的验证方式^[3-4]。

1.2 与鉴定检验、用户试用的关系

鉴定检验是按照已确定的“标准”进行符合性测试和试验,一般不关注用户具体的应用环境和条件,只关注产品的质量水平是否满足“标准”。应用验证关注产品及实现过程控制能力和数据分布规

律及随应力变化的归零,得出成熟度和适用性的结论,与鉴定检验相互补充^[3-4]。

用户试用可看作一类原始、初级的“验证”,是特定用户根据其理解进行的一系列试验和试用工作,以确定功能性能是否满足某一特定应用状态。应用验证的目标是需覆盖主要背景应用型号的应用状态、覆盖相关用户的典型应用状态,实现“覆盖型号、覆盖用户、覆盖元器件”,责任主体是专业验证机构,联合研制单位、用户单位等多方专业机构开展验证,整个验证贯穿于元器件的全部研制过程^[3-4]。

1.3 发展情况

美国非常重视新型元器件应用前的保证工作,美国国家航空航天局(NASA)设置了专门的组织机构——元器件和封装项目组(NASA's Electronics Parts and Packaging program, NEPP)、电子/电气/机电元器件保证组(NASA EEE Parts Assurance Group, NEPAG)。这两个组织机构负责元器件的评估和应用研究工作,降低新型元器件空间应用的风险,确定新工艺元器件应用前的验证工作流程和实现验证信息交换、结果分析交流和发布等^[5-7]。

欧洲航天局(ESA)也非常重视宇航元器件的评估、准入和应用研究工作,设立了专门的组织机构和研究机构,建立并维护包括欧洲宇航元器件保证要求、鉴定合格元器件清单和优选元器件清单等标准在内的欧洲空间元器件协调委员会(European Space Components Coordination, ESCC)合作组织和规范体系。该体系中包括识别元器件在空间应用中的缺陷并提出改进建议、改进技术,最终进行试验并评估宇航应用适用性^[5-7]。

日本在航天领域的发展十分迅速,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)在宇航元器件应用验证研究发展中发挥着重要作用。在日本宇航元器件保证大纲中,“验证”主要是指在规定环境下验证元器件功能、性能和可靠性与元器件研制及应用要求符合性的一系列试验。

在国家核高基重大专项支持下,自 2010 年以来,我国全面系统地开展了宇航元器件应用验证理论研究,对元器件应用验证总体技术和基础技术的

研究取得了丰硕成果。以系统工程方法论为指导思想,创造性设计了一套完整的应用验证流程、方法和判据体系,为应用验证的工程实践打下了坚实基础。提出了“成熟度-适用度-可用度”综合评价框架及以其为核心的“需求调研—需求分析—指标建立—项目确定—流程建立—流程实现—综合评价—结果应用”工程路线。开发了包括极限评估技术、结构分析技术、空间环境适应性评估技术、力热环境适应性评估技术、系统适应性评估技术等在内的体系化应用验证基础技术。结合国家重大专项工作中对应用验证的实践,逐步建立了一套符合国情的元器件应用验证技术体系和工程管理方法^[7-8]。

2 元器件应用验证的技术框架

2.1 应用验证与系统工程

系统工程理论是以研究大规模复杂系统为对象的一种方法论。实践证明,系统工程是研究解决复杂系统行之有效的技术手段。从 20 世纪 50 年代“阿波罗”登月计划,到 20 世纪 90 年代我国的三峡区域经济研究,再到 21 世纪的载人航天工程,系统工程已经成功应用到社会、经济、军事等各个领域,系统工程的理论和方法在航天事业的发展中也得到了广泛应用^[7,9-12]。

元器件应用验证是一个典型的系统工程工作,系统工程理论可以作为应用验证的技术方法。在系统论的基础科学层面,元器件应用验证属于开放复杂系统。在应用验证过程中,需要应用信息学、控制学、运筹学和模糊学等基础科学。应用验证主要是解决元器件的整体应用问题,最终目标是实现工程应用;而系统工程是从总体上改造客观世界的工程技术实践,是系统科学的工程应用。对于宇航元器件应用验证,系统工程综合研讨的方法,能够将专家的科学理论、经验知识乃至专家智慧,转化成对应用验证的全面认知;系统分解-集成的思想能够将应用验证分解为若干个子系统,并对分解出的子系统进一步分解,直至涵盖应用验证的全部主要要素;运用由定性到定量的评价思想,采用相对定量方式将元器件成熟度、适应度和可用度均划分为 5 个等级。宇航元器件应用验证系统工程方法论体系框架如图 1 所示^[3-4,7]。

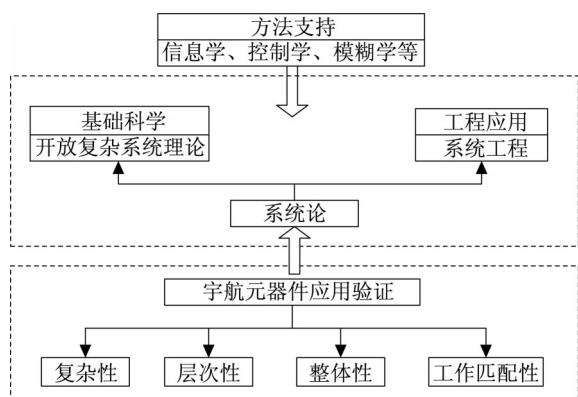


图1 元器件应用验证系统工程方法论体系框架

Fig.1 Methodology system framework of application validation for components

软系统工程方法论与硬系统工程方法论有机结合,应用WSR方法论,充分考虑专家的作用,达到整体目标的综合最优。重视专家知识系统建设,将多型号、多学科、多领域专家学者所具有的理论、经验知识和判断力相结合,形成知识系统。应用基于主观度的双组合评价方法。设置双角度-成熟度和适用度两个角度评价要素,采取主观和客观相结合、定性和定量相结合的双路径评价元器件可用性。应用验证方案和结论经元器件研制单位、用户单位、型号系统、管理部门等多方专家认可,最大限度地平衡各个利益相关方的诉求^[3-4]。

实施项目管理,纳入型号年度科研生产工作计划,依托元器件应用验证平台的硬件和软件资源开展验证实施工作。以元器件应用验证为核心,以元器件产品和研制生产过程为对象,面向元器件应用,由项目总体单位牵头,协调元器件研制生产单位、型号系统和用户单位共同解决国产元器件的成熟度、适用性和产品可用度的问题,构建应用验证组织机构和实施工作模式。

平台是应用验证实施的主要支撑手段,由实施应用验证工作所需的一系列软、硬件保障条件组成,主要包括:完成应用验证工作的一系列相互关联的仪器、设备、系统或装置及其配套软件,开展应用验证所需的手册、指南、规范、标准等技术文件,以及对应用验证实施进行管理的组织机构和信息管理系统等。平台可划分为测试试验平台、规范标准平台、组织管理平台。

2.2 技术框架

以系统工程理论为指导,将研究内容分为应用验证总体技术研究和应用验证基础技术研究两大部分。应用验证总体技术研究,解决应用验证的总体内容框架和相关方法,如应用验证的指标体系、工作项目与流程、方法与判据、项目管理、质量管理和整个应用验证工作的支撑平台等问题,其中,包括应用验证流程研究、方法和判据研究、项目管理研究、质量管理研究和验证平台研究等。应用验证基础技术研究,解决应用验证工作项目实施需要的具体技术相关方法,其中,包括应用验证测试技术研究、结构分析技术研究、极限评估技术研究、空间环境适应性评估技术研究、力和热环境适应性评估技术研究、系统适应性评估技术研究等。应用验证总体技术和基础技术框架如图2所示。在宇航元器件应用验证总体技术和基础技术的牵引下,应用验证已经取得了一系列研究成果,包括核心框架、工程路线和技术体系,以及标准、指南、手册和软硬件等方法工具,应用验证工作模式、组织结构和管理制度规范等。随着应用验证工程的开展,这些研究成果将有效指导工程实践,并通过工程实践进一步完善丰富,为我国宇航元器件应用验证工程实施和管理积累宝贵的理论和实践经验^[7]。

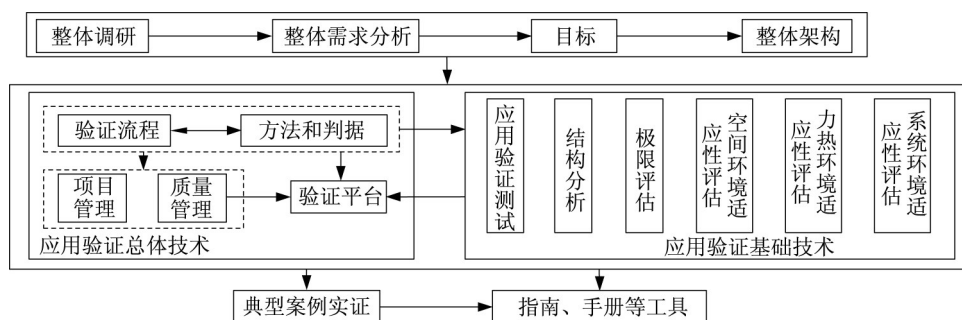


图2 应用验证总体技术和基础技术框架

Fig.2 Overall technology and basic technology framework of application validation

应用验证需要开展元器件的研制成熟度、应用适用度评价和可用度综合评价。研制成熟度(简称成熟度),是指元器件在设计、工艺、材料、试验和过程控制等研制生产及质量保证能力的综合得分,与对应等级判据比对得出的评价结果;成熟度评价关注元器件在设计、制造及工艺、过程控制等方面的过程要素和元器件的功能性能、可靠性等产品指标。应用适用度(简称适用度),是指元器件的宇航应用环境及系统的适应能力的综合得分,与对应等级判据比对得出的评价结果;适用度评价关注元器件空间环境适应性、系统适应性等指标。可用度是对成熟度和适用度进行进一步综合分析评估,并与对应等级判据比对得出元器件可满足宇航应用要求的量化综合评价结果。可用度间接表征了元器件在宇航应用中的风险程度,可用度越高,风险越小,反之亦然。

因此,成熟度、适用度和可用度综合评价,构成了应用验证工作的核心,同时也决定了应用验证工作具有多阶段、多领域、多目标、多任务和多参与方等特点。具体表现为:1)应用验证需要开展元器件研制生产阶段的过程要素评价和产品的元器件阶段、地面整机阶段及飞行阶段等多个阶段的验证评估;2)应用验证涉及元器件研发与制造、质量保证、宇航项目系统与工程、质量管理和项目管理等多个领域;3)应用验证要解决“不好用”“不敢用”和“用

不好”等多个问题;4)应用验证涉及多类型、多品种元器件的评价分析,涵盖了综合评价技术、流程设计技术、项目管理技术、质量管理技术、平台构建技术、结构分析技术、极限评估技术、空间环境适应性评估技术、系统适应性评估技术和验证测试技术等多项研究任务;5)应用验证包括宇航项目系统、元器件用户单位、元器件生产单位、验证实施单位和第三方鉴定机构等多个参与方。

3 元器件应用验证技术的工程实践

3.1 工程实施路线

元器件应用验证工程实施路线分为3个阶段(如图3所示):第1阶段完成了应用验证总体技术和基础技术研究,创建了一套适合宇航元器件研制、应用的国情应用验证技术体系和管理体系,建立了一套采用系统分析、系统评价和系统决策技术对成熟度、适用度和可用度进行评价的方法,开发了一套包括标准、指导手册、技术指南、综合评价软硬件系统、专家遴选系统和典型验证装置等的验证工具;第2阶段为应用验证项目实施,包括生产过程要素评价、功能和性能测试分析、可靠性分析、应用适应性试验与分析等;第3阶段为应用验证信息发布和应用,包括发布应用验证结论、验证合格产品清单和应用指南。

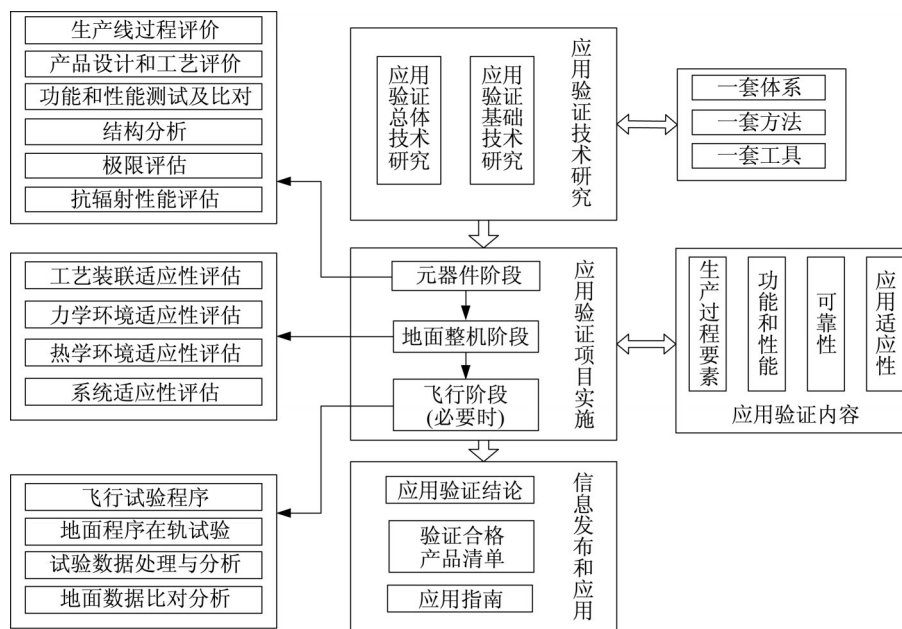


图3 元器件应用验证工程实施路线图

Fig.3 Implementation roadmap of application validation for components

3.2 工程实践情况

为保证北斗导航、载人航天等国家重大专项工程建设和后续长期维护,我国提出了关键元器件国产化的明确要求,适时启动了国产元器件的应用验证任务。国家相关部委和研制单位首次在型号方案阶段系统性开展了国产化元器件梳理和选用,紧密结合型号研制开展应用验证,有效促进研用合理转化。以北斗导航卫星为例,对于工程的近 500 款关键国产元器件进行了全面的应用验证工作,数据表明,大约有 15%~20% 的国产元器件可靠性和可用度不满足装备应用要求,其余元器件均得到上机应用。2020 年 6 月,我国成功发射北斗系统第 55 颗导航卫星暨北斗三号最后一颗全球组网卫星,北斗三号全球卫星导航系统星座部署全面完成,北斗卫星导航系统工程总设计师在 2020 年世界 5G 大会主论坛上宣布北斗三号卫星核心器件国产化率达 100%。

3.3 应用验证发现的典型问题及解决措施

总结多年来航天科技集团公司各元器件应用验证中心发现的问题,主要可以分为元器件研制单位对应用要求了解不足、研制技术未吃透产品存在缺陷、用户应用不合理共 3 大类问题。通过研制单位、用户单位和验证中心的集智攻关,对存在缺陷的国产元器件进行改进和优化,并对改进后的产品进行补充验证,解决了元器件应用问题,发布应用指南指导设计师合理选用,提高型号产品质量可靠性水平。

1) 元器件研制单位对宇航应用要求了解不足。代表案例:国产某型数字逻辑电路封装与进口某公司产品封装不一致问题。某型国产数字逻辑电路与对标进口器件均采用表贴封装,但所用管壳底部引出端存在差异。国产产品没有凸台(如图 4 所示),进口产品底部有凸台(如图 5 所示),即器件管脚和外壳底部平齐,管脚不能形成脚跟和脚尖,无应力释放弯,引线应力不能释放,在电装时需要专门制作成型模具或选择倒装成型,但倒装成型后器件管脚定义正好镜像,需用户在设计、测试时注意。

2) 元器件研制单位对研制技术未吃透,产品存在缺陷。代表案例:国产 DSP 高密度键合应用可靠性问题。结构分析发现国产某型 DSP 内部键合结

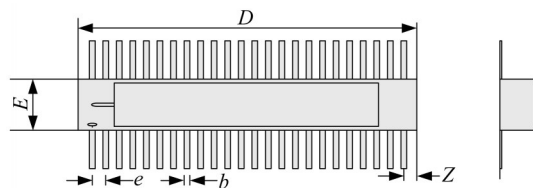


图 4 国产某型数字逻辑电路顶视和侧视图

Fig.4 Top view and side view of a domestic digital logic circuit

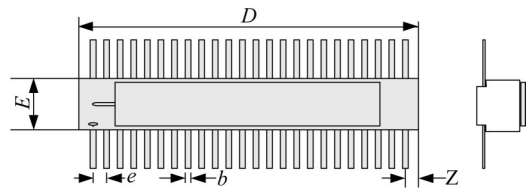


图 5 进口产品数字逻辑电路顶视和侧视图

Fig.5 Top view and side view of an imported digital logic circuit

构(如图 6 所示)与国外进口器件相差较大,进口器件采用倒装方式(无键合丝)进行安装,而国产器件采用了 30 μm 金丝球焊工艺,内部键合丝数量为 339 根,采用了 4 层高密度方式排列,最长键合丝长度为 3 mm,键合丝最小间距 330 μm ,存在键合密度过高隐患。针对该问题开展加电的力学环境验证试验,在随机振动和冲击应力下发生了内部键合丝碰触问题。为进一步降低型号应用风险,结合型号整机的应用条件对 DSP 进行补充试验方案,确定可靠应用的力学环境条件。另外,通过键合丝外部镀膜等方法解决了该问题,并对后续大规模集成电路内部键合丝的长度、间距等进行了明确规定。

3) 对用户应用条件覆盖不全、验证不充分。第 3 类问题是由于元器件研制单位、应用验证中心对应用状态和条件了解不足,所设计的验证项目和条件没有完全覆盖应用条件,虽然通过了元器件级应用验证,但在板级验证阶段暴露问题。某型国产锂电管理芯片,调研应用背景时未充分了解器件应用方法,用户在使用时为防止内部寄存器出现单粒子翻转将工作程序设置为每一次采集循环后进行 Shutdown 动作,即对内部寄存器进行清空。设计器件级寿命试验时未考虑该种工作模式,对内部结构单元的长期可靠性考核不充分,无法暴露问题。虽经 2 000 h 寿命试验后器件电参数测试合格,但在板级热循环验证试验过程中,发现低温环境下该器件会出现单体电池电压采集误差较大、不满足 10 mV

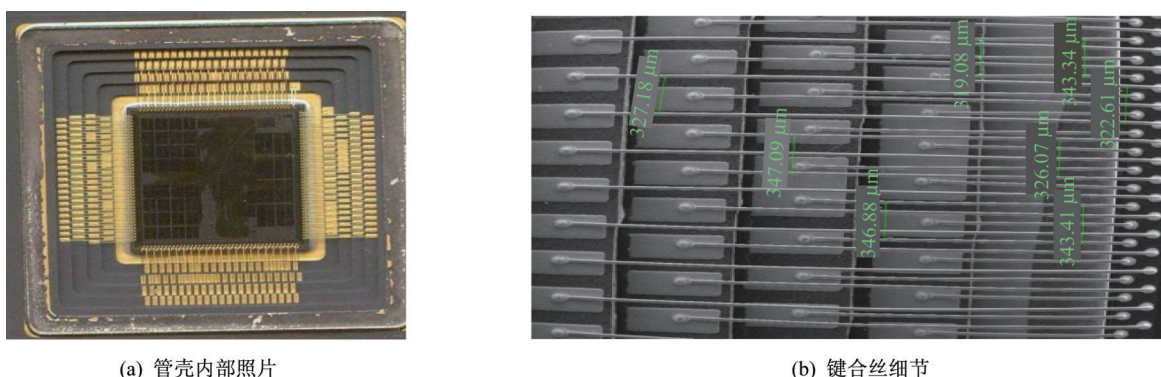


图 6 国产某型 DSP 内部键合照片

Fig.6 Internal bonding photos of a domestic DSP

精度要求的现象,经分析后定位于用户应用状态下器件内部开关电路 MOS 管会持续受到超出耐压范围的大电压冲击,呈现导通电阻增加现象,导致晶

体管在通道切换时不能完全导通,最终造成数据采集异常。某型锂电管理芯片内部 DUMP 模块电路结构如图 7 所示。

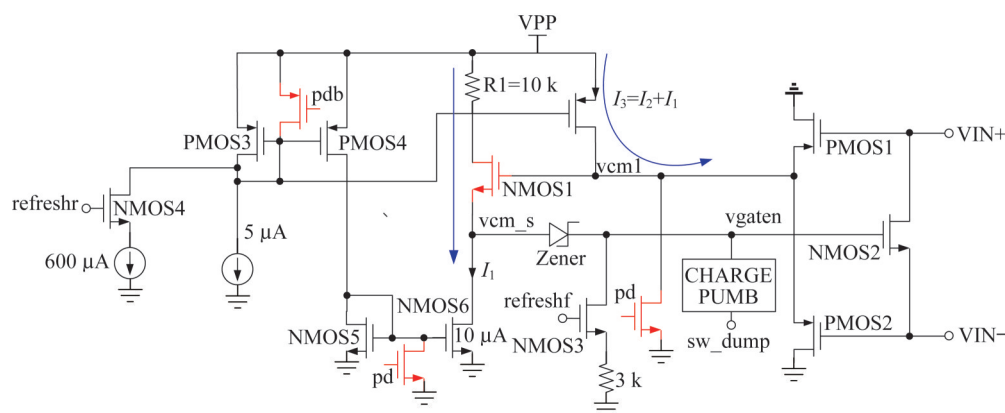


图 7 某型锂电管理芯片内部 DUMP 模块电路结构

Fig.7 DUMP module circuit structure of a lithium battery management chip

研制单位对锂电管理芯片内部 DUMP 电路模块进行了电路优化设计,改进了 DUMP 电路模块中 NMOS1 的全过程工作状态,确保其工作时不再出现过压的情况。改版后器件在典型应用工况下功能性能正常,解决了旧版芯片的问题。

3.4 对型号装备用元器件国产化工程实践的体会

1) 以型号为牵引,确立国产化内涵与目标,加强统筹策划要以型号为牵引,根据不同型号的特点,研究并确立具体的产品国产化内涵与工作目标,统筹策划,分步实施,全面保证元器件国产化工作的不断深入。

2) 以需求为核心,梳理优化品种,明确重点,由型号确认国产化对象和要求,确保合理性与准确

性,使需求的提出与满足需求产品最终应用形成闭环。

3) 以应用验证等为重点,结合型号研制确定元器件国产化流程,加强应用验证、专项规范等重点工作策划与组织实施,注重型号研制队伍参与。充分继承现有的元器件研制、标准、应用验证等技术成果与管理模式,根据型号特点集成创新,形成满足型号要求的元器件国产化技术与计划流程。

4) 以落实责任为手段,发挥各方优势,确保国产化元器件成功应用要充分发挥管理机构、用户单位、元器件研制单位、标准化机构、鉴定机构、应用验证机构、保证机构等各方优势,形成合力。制定并落实应用国产元器件的政策和措施,明确责任主体,确保国产元器件应用取得实效。

4 应用验证技术展望

近年来,以 GaN 微波功率高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)、SiC 和绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)等高压器件、电阻相变存储器、硅通孔(TSV)3D 封装技术、硬件可重构系统、自旋转移力矩磁性随机存取存储器、SiP 及集成 FPGA 的系统级芯片(System on Chip, SoC)等为代表的先进结构和设计封装技术,将是 NASA、ESA 近期和未来 10 年积极推进和规划的技术需求。这些发展战略和选用思路,对我国军用元器件的研制和选用,具有很好的借鉴意义。国内相关高校、科研机构也在跟踪和开展国产器件的研发。对于这些新结构、新工艺、新材料的国产器件,可以在产品研发阶段融入应用验证及早期的可靠性评价方法研究,通过联合集智攻关形成具有中国特色的原创性科学技术成果,指导国产高性能高可靠元器件的研制和批量上装应用^[13]。

商用货架(Commercial Off-The-Shelf, COTS)器件和汽车级器件技术先进、性能优越,其性能一般优于宇航级高可靠器件 1~2 代,具有成本低、封装尺寸小、采购周期短、可获得性高等特点。但 COTS 器件、汽车级器件的设计和制造时,并非面向严酷工作环境,直接应用于空间环境存在诸多风险。在正式应用于空间系统前,通过应用验证全面识别其空间应用的风险,得到可承受极限值、失效模式、薄弱环节等,合理评价空间应用的可靠性及适应性,有效指导设计师使用高性能 COTS 器件和汽车级器件设计商业卫星,达到“事半功倍”的效果。

民用领域高端高性能器件应用带来评价验证潜在需求,近年来人工智能、5G 概念热潮蔓延,5G 芯片、人工智能芯片、物联网芯片如雨后春笋般崛起。这些高端高性能器件,在定型量产和投入市场前,开展一定的应用验证工作,对于帮助研制单位发现设计/工艺/结构缺陷、了解器件性能参数与设计期望值的差异具有一定帮助。

5 结束语

在系统工程理论和方法的指导下,形成了具有中国特色的元器件应用验证系统工程管理的理念、体系和方法,建立了元器件应用验证技术体系和管

理体系框架,取得了较多创新性的科学和技术成果,为我国元器件应用验证工程提供了理论指导和技术方法工具,为加快我国军事装备用国产元器件推广应用提供了可行的技术路径,为提升军事装备用元器件自主保障能力提供了有效支撑。在不断丰富、完善技术体系和管理体系的过程中,元器件应用验证工作,能够为我国军用元器件和国防装备事业的发展提供有力保障。

参考文献

- [1] U. S. Department of Commerce. The export enforcement act of 2007 [R]. 2007.
- [2] U. S. Department of Commerce. Revisions and clarification of export and export controls for the People's Republic of China [R]. 2007.
- [3] 江理东,孙明. 宇航元器件应用验证系统工程(第一卷):宇航元器件应用验证总体技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2020.
- [4] 江理东,孙明. 宇航元器件应用验证系统工程(第二卷):宇航元器件应用验证基础技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2020.
- [5] BABUSKA I, ODEN J T. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(36/37/38):4057-4066.
- [6] MAROPOULOS P G, CEGLARTEK D. Design verification and validation in product lifecycle [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2010, 59(2):740-759.
- [7] 江理东,郭鹏,张延伟,等. 宇航元器件应用验证系统工程研究[J]. 航天器工程,2012,21(3):124-129.
- [8] 孙明,吕文学,白凡. 宇航元器件应用验证项目管理的论与实践[J]. 电子元件与材料,2011,30(12):65-70.
- [9] 郭宝柱. 中国航天系统工程方法与实践[J]. 复杂系统与复杂性科学,2004,1(2):16-19.
- [10] 王礼恒. 中国航天系统工程[J]. 航天工业管理,2006(10):60-64.
- [11] 马兴瑞. 中国航天的系统工程管理与实践[J]. 中国航天,2008(1):7-15.
- [12] 张连成. 以航天系统工程理念推动预先研究工作[J]. 航天工业管理,2011(5):4-6.
- [13] LABEL K A, SAMPSON M J. The NASA electronic parts and packaging (NEPP) program: roadmap for FY15 and beyond [EB/OL]. [2021-03-03]. <http://nepp.nasa.gov>.