

机载电子元器件国产化替代应用验证技术研究

刘江, 王宇峰

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要: 当前航空武器装备国产化需求迫切, 机载环境对电子元器件要求较高; 通过开展替代应用验证, 提前发现国产电子元器件与进口元器件的差异性以及国产器件的环境适应性和可靠性, 在批量航空装备生产前可以有助于提升国产元器件的技术成熟度; 结合已开展的国产化替代应用验证工作经验, 系统性地阐述了国产化替代应用验证流程、任务分工、验证方案、实施过程以及验证评价结论; 采用该方法对国产元器件开展验证, 测试结论满足国产化替代验证要求, 为其他领域开展国产化替代验证工作提供了参考, 具有较好的工程实用价值。

关键词: 机载电子元器件; 国产化; 自主可控; 替代应用验证

Research on Substitution Application Validation Technology for Airborne Electronic Components

LIU Jiang, WANG Yufeng

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: It is currently urgent for the domestication of aviation weaponry equipment, and electronic components require high requirement in airborne environments. By conducting relevant substitution verification, the differences between domestic components with foreign ones can be identified in advance, along with the environmental adaptability and reliability of domestic components, which helps to improve the technical maturity of domestic components before the batch production of aviation equipment. Based on the domestic substitution verification already carried out, this paper systematically elaborates on the verification process, verification scheme, task assignment, implementation process and verification evaluation conclusion. This method is used to verify domestic components, and test conclusions meet the requirements of domestic substitution, which provides a reference of substitution validation in other fields, with a good engineering practical value.

Keywords: airborne electronic component; localization; autonomous controllable; substitution application validation

0 引言

机载电子元器件是构成航空设备的基础, 对整个机载设备的功能、性能稳定性及可靠性具有决定性作用。长期以来, 受制于国内芯片技术发展水平, 机载电子元器件大量使用国外产品。“棱镜门”事件表明, 大量使用的国外计算机软硬件系统可能存在内置的后门和漏洞^[1], 会成为失泄密乃至影响信息系统正常运行的重大安全隐患, 其根本解决之道是走自主可控道路^[2-4]。

“自主可控”是指依靠我国自有技术和产业, 实现信息产品从硬件到软件的自主研发, 核心技术、关键零部件和各类软件全部国产化, 生产、升级和维护全程可控^[5]。随着国际环境的变化, 自主可控的问题日益突出, 以“中兴”“华为”等事件为契机, 更多的国内电子产品生产厂商为了保证供应链的安全, 开始逐步寻求

国产的器件来替代国外的器件^[6]。为了避免使用进口电子元器件因限购、禁运、停产等带来的供应风险, 防止在关键时刻我国航空工业被国外“卡脖子”, 当前机载电子元器件的国产化替代工作已刻不容缓^[7]。

国产化替代应用验证主要指采用国产自主可控研发生产的器件, 对标国外功能相似、性能相似的进口器件, 采用原位替代、调整替代、功能替代、优化替代等方式, 通过一系列检测、试验、分析、评估和综合评价, 用以确定国产器件对进口器件可替换程度和型号工程适用度的一项工作。应用验证属于新的工程项目, 国内外尚没有专门针对宇航元器件应用验证质量管理的研究。美国、欧洲和日本都建立了较为完备的宇航元器件标准体系, 但都没有明确的应用验证流程更没有明确地用来保证应有验证质量的标准^[8]。

收稿日期:2025-01-17; 修回日期:2025-02-27。

作者简介:刘江(1985-),男,大学本科,高级工程师。

引用格式:刘江,王宇峰.机载电子元器件国产化替代应用验证技术研究[J].计算机测量与控制,2025,33(12):329-334.

现有开展替代验证最为充分、积累经验最多的是航天领域,针对宇航元器件的应用验证,已经建立了完整的管理、分析、评价体系^[9]。但上述研究成果仅适用于航天领域,不具有普遍的适用性。航空武器装备的多样性、执行任务的多样性、长期反复使用的工作稳定性,以及环境的严酷性对电子元器件提出更高和更多的要求^[10-11]。航空机载环境要求所选用的电子元器件能够长期适应高温、低温、快速温度切变以及复合振动冲击、高湿度、低气压等严酷特殊环境,并且要求机载设备在几十年的长生命周期服役时间里,保证产品功能和性能不变的同时保证产品的可靠性和系统的稳定性。通过开展替代应用验证,在批量航空装备生产前可以提前发现国产电子元器件与进口元器件的差异性,以及国产器件在机载武器环境的适应性和可靠性,有助于提升国产元器件的技术成熟度。对于促进我国电子元器件自主研制生产及装备自主保障能力具有重要的战略意义^[12-14]。

本文结合某型机载子系统项目国产化替代应用验证实例,系统性的阐述了在机载平台如何使用国产化电子元器件开展进口器件替代应用验证的方法。为其他机载电子元器件的国产化替代应用验证工作提供了可借鉴思路,指明了具体可操作性,也可供其他领域开展国产化替代应用验证作类比参考。

1 国产化替代应用验证背景

随着我国在国产基础软硬件方面的投入不断加大以及国家政策的指导,国产基础软硬件发展迅速,已接近国外同期水平^[15]。国内电子元器件生产厂家一般都依据国家军用标准制定相应的企业标准并对器件进行考核,但这些都是通用标准,与实际型号工程应用要求存在一定差距^[16]。国产化电子器件在制造验收时合格,但在实际装机使用过程中出现较多的问题;许多国产电子元器件进行单一性能分析可以实现进口替代,但是实际应用存在系统不匹配、不兼容的问题以及可靠性寿命低问题。致使存在问题或隐患的元器件在装机或使用时出现故障^[17]。

国产元器件应用问题突出,除了国内工业基础薄弱等问题外,重要的原因是元器件从研制到使用缺少一个重要环节,即元器件的应用验证环节^[18]。因此开展元器件替代应用验证搭建了元器件研制和工程应用之间的桥梁^[19]。围绕航空武器装备的特点和可靠性需求,以型号研制为牵引,同步开展国产化替代应用验证工作,统筹策划,分步开展实施,提高项目国产化率的同时提升国产元器件的技术成熟度,减少后期装备批量生产质量风险。

2 国产化替代应用验证流程

国产化替代应用验证的工作流程一般包括验证分

工、验证方案制定、验证实施、验证综合评价及验证结论等。

2.1 具体工作流程

工作流程如图 1 所示。



图 1 国产化替代应用验证工作流程图

2.2 国产化替代应用验证分工

国产化应用验证分工,主要指相关单位在项目平台的角色分工,对应承接不同层级的替代应用验证工作。验证课题由军方机关部门立项验证项目,军代表室实施监管,主机厂所为整机总体,分系统单位为系统总体,各参研单位为验证实施主体,第三方试验单位负责试验开展。

一般来说,机载电子元器件的替代应用验证完整验证层级包括了器件级验证、模块级验证、设备级验证、系统级验证、整机(飞机)级验证。通过多级验证,来充分评估器件在工程应用中的可靠性等相关信息,分散系统级、外场级验证的风险,提高工程应用的成功率^[20]。

在具体验证过程中,应充分结合验证任务要求,统筹考虑验证经费、验证进度等。国产化替代应用验证方案包括应用验证总体方案、各验证层级详细实施方案,方案评审通过后实施。验证层级根据飞机成品结构树组成,按照器件级、模块级、设备级、系统级、整机级的顺序,逐级开展。验证方案内容需明确待验证的国产化器件及对应进口器件清单,规定验证所进行的试验项目、方法、判据、试验条件等,包括验证流程、验证方法、进度要求、工作分工等内容。

各验证层级顺序关系如图 2 所示。验证过程中,按照对应层级先后顺序开展测试,各项测试数据与评价判据对比评估得出相应的验证结论。根据验证顺序,当上一个验证层级验证结论为通过,再开始下一层级验证;当某个验证层级不通过,应终止下一层级的验证,验证方提交验证分析失败具体原因,明确指出国产验证器件的缺陷,并据此申报更换国产化器件验证清单。换型评审通过后,重新制定换型器件的验证实施方案,并按照验证层级顺序,开展所有层级验证。必须所有验证测试层级均通过后,才可进行工程应用推广。同时验证失败的案例也作为验证成果之一,用于项目总结经验分享。

2.3 国产化替代应用验证方案

2.3.1 器件级验证方案

原则上器件级验证应由具备相关资质的第三方标准测试实验机构按其标准开展。

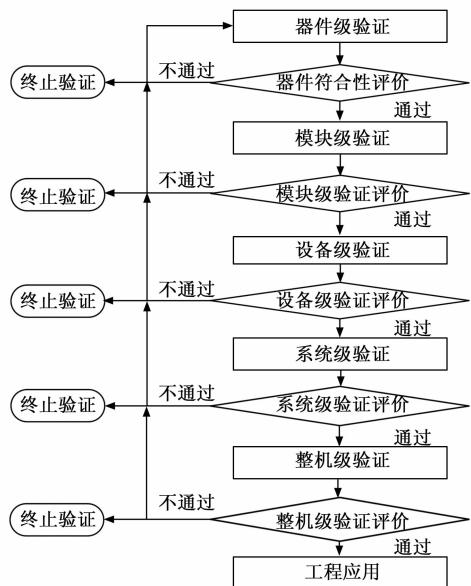


图2 国产化替代应用验证层级

试验机构主要从以下内容开展验证,经综合评估后出具元器件的可用性建议及国产化自主可控等级评估结果:

1) 元器件研制情况。包括生产厂家情况、生产线情况、元器件研制背景、研制状态(如继承性、新技术应用程度)、技术文件、研制过程中产生的各种数据(包括图表)和相关文字记录等;

2) 元器件质量保证情况。包括已有的质量保证经历、鉴定或认定结论、参数测试情况、筛选不合格率及剔除情况、寿命及存储情况等;

3) 供应链安全情况。包括IP核使用情况,基础原材料产地、流片厂家、国别等,重点审查是否存在“伪国产化”“空心化国产”“包装国产化”非自主可控情况等;

4) 元器件实物检查情况。包括拆解、切片检查实物器件的封装结构、晶圆材料、互连方式、芯片工艺等,分析其自主可控性、设计合理性和工艺可靠性等。

2.3.2 模块级验证方案

模块级验证主要以电路板作为验证载体,对模块/组件/子卡开展与验证器件密切相关联的功能、性能、接口测试,以及操作系统及驱动软件适配性测试等,是应用层与元器件关联度最大的验证层级。

模块级验证方案主要包含如下内容,经综合评估后出具该元器件在模块级验证评价结果:

1) 调研进口器件以及用于替代的国产器件,收集器件基础资料,收集国产器件自主可控承诺书或第三方机构出具的自主可控等级评估报告;

2) 整理进口、国产器件资料,对器件的类别、封装、功能、复杂程度等信息进行归纳,对国产和进口器

件功能性能指标差异进行分类比对;

3) 对需要替代验证的国产器件进行验证方案设计,根据器件在本模块/组件/子卡的功能与作用,从设计原理上分析器件在本层级验证的可行性,得出具体的测试方案;

4) 国产器件替代验证情况分为以下3种:

(1) 原位替代:国产元器件在电气特性、功能性能,能够覆盖对标国外元器件产品,且封装形式一致,在硬件电路上可直接原位替换。

(2) 更改设计:国产元器件在功能性能,能够覆盖对标国外元器件产品,但封装形式、电气特性不一致,在硬件电路上需要重新设计外围电路。

(3) 功能替代:国外元器件产品在电气特性、功能性能上没有可替代的国产基础产品,在装备硬件电路设计上需要通过其他基础产品器件进行功能替代。

5) 模块级验证内容主要包括:模块级的软件加载验证、接口测试、功能测试、性能测试,环境适应性验证,可靠性强化试验验证等。各项环境试验条件主要依据项目试验大纲要求,相关测试方案可参考该模块的测试细则,但要求测试项务必覆盖到测试器件的功能性能。每项验证测试均需给出验证结果,最后给出综合评价结论。

2.3.3 设备级验证方案

设备级验证是在完成模块级验证的基础上,以设备作为验证载体,通过开展与验证器件密切相关联的设备功能、性能测试,环境适应性的测试等,验证设备是否能满足成品技术协议各项要求。

对开展设备级验证的国产器件,根据替代器件在设备形成的功能与作用,从设计原理上分析器件在设备级上验证的可行性,并得出具体的验证设计方案。

设备级验证内容主要包括:设备功能、性能测试,机械环境试验,热学环境试验,电源特性试验,电磁兼容性试验,可靠性强化试验验证等。各项环境试验条件主要依据项目试验大纲要求,相关测试方案可参考该模块的测试细则,但要求测试项务必覆盖到测试器件的功能性能。每项验证测试均需给出验证结果,最后给出综合评价结论。

2.3.4 系统级验证方案

系统级验证是在设备级验证的基础上,以分系统/子系统作为验证载体,通过开展与验证器件密切相关联的系统级测试,完成本系统与其他系统的功能和性能测试。对系统战技指标、功能性能进行综合考核和评估,重点关注验证元器件相关联功能完成情况以及重要性能指标表征。要求测试项务必覆盖到测试器件的功能性能。

系统级验证主要包括系统功能、性能验证及系统对

外接口测试验证等。

2.3.5 整机级验证方案

整机级验证是在系统级验证的基础上,以飞机为验证载体,通过实际装机,验证元器件在载机各种复杂严酷环境条件下工作稳定性情况。

整机级验证主要包括装机地面验证和装机试飞验证等。

2.4 国产化替代应用验证结论

各层级国产化替代应用验证单位在验证实施完成后,给出本层级验证结论意见。评价结论主要包括可用、有条件使用和不可用三类。具体定义如下:

1)“可用”代表国产基础器件符合本应用验证项目对该元器件应用验证指标要求,可用于替换进口器件的给出“可用”结论;

2)国产器件与进口器件存在一定的性能差异,但不影响元器件功能正常使用,或者在一定条件下可以满足某些应用需求,给出“有条件使用”结论,需明确给出限定使用条件;

3)国产器件与进口器件存在较大指标差异或国产器件自身存在较大的缺陷,无法满足项目使用需求,给出“不可用”的结论。经查实器件被识别为“伪国产化”“空心化国产”“包装国产化”或厂家拒绝提供自主可控承诺书而被列为“疑似三化产品”的直接列入不可用评价。

2.5 国产化替代应用验证风险

虽然近年来国防工业部门对国产电子元器件下大力做了质量提升工作,但与进口器件比较,在验证充分性、质量稳定性等方面还是存在一定差距。一些已经通过鉴定的国产器件在实际使用中,仍然会暴露出一些设计缺陷以及相关隐性问题。

因此,替代验证前需考虑存在部分国产器件存在替代验证不成功的风险。国产化应用验证风险及主要应对措施如表 1 所示。

在替代验证过程中,发现选定的国产器件有明确的缺陷,不能满足装机使用要求或重要参数指标性能未能达到要求时,可考虑使用同类国产器件开展备份验证工作,重新开展所有验证测试。

3 国产化替代应用验证案例

某型机载系统总体单位根据任务要求,开展了机载电子元器件国产化替代应用验证工作。通过对验证任务分解,系统总体单位分别组织各验证单位编制了各验证层级的验证方案评审,逐级开展了验证实施。验证层级按照机载系统的硬件组成,分别开展了器件级、模块级、设备级、系统级、整机级试验验证。最终经过验证综合评价,对验证的 X 项国产化电子元器件给出了验证结论。

表 1 国产化应用验证风险分析

序号	验证风险	风险概率	影响度	应对措施
1	国产元器件验证测试过程中故障或缺陷	高风险	影响对应进口器件的替代验证结论	1)优先选择国内科研院所生产器件,或行业内有较高知名度国产厂家器件; 2)加强前期单板摸底测试,在验证试验前做好国产器件的充分摸底,尽量探出器件边界条件;
2	国产器件性能与进口器件技术差异	高风险	影响对应进口器件的替代验证结论	1)标定器件使用的关键指标参数,判定参数差异是否影响关键指标决定器件验证结果; 2)列表逐一对比国产进口器件功能性能指标差异,尤其关注临界、边界值
3	国产器件判定为“伪、空、包”器件	中风险	影响国产器件的验证结论	在元器件自主可控等级判定结果前,尽量不开展其他测试,避免重复投入
4	国产器件可靠性不足	低风险	影响产品使用寿命	通过可靠性强化试验,步进探测器件的工作环境临界条件以及器件稳定工作时间,对比器件手册指标,给出让步接收建议
5	国产器件验证测试覆盖率不全面	低风险	影响器件使用全面性	全面对照器件手册,结合项目的使用条件,尽量保证指标测试的全面性覆盖

3.1 验证任务分工

根据国产电子元器件验证清单结合机载系统的硬件组成,验证任务分工如表 2 所示。

表 2 某型机载系统国产化替代应用验证分工

序号	验证对象				验证层级	验证单位
	元器件名称	进口件规格	国产件规格	国产件制造商		
1	二极管	AA	BB	X1 厂家	器件级	V 研究所
					模块级	W 单位
					设备级	X 单位
					系统级	Y 单位
					整机级	Z 单位
2	DSP 处理器	CC	DD	X2 厂家
3

3.2 验证方案

3.2.1 器件级验证方案

器件级验证方案由第三方实验机构国内 V 研究所,根据实验机构标准开展实施。

3.2.2 模块级验证方案

1) 器件数据对比收集:

模块级验证工作由 W 单位开展。对于验证载体模块,验证工作主要包括:进口器件 AA 以及国产器件 BB 数据收集对比,如表 3 所示。

表 3 国产 BB 器件与进口 AA 器件特性对比表

选项	进口器件	国产器件	器件功能性能 本模块覆盖性
器件型号	AA	BB	-----
替代类型	原位替代/更改设计/功能替代		
生产厂家	XX 厂家	YY 厂家	-----
类型	肖特基二极管	肖特基二极管	-----
功能性 能指标	1. VF=0.49 V 2. IF=2 * 20 A 3. XXX 4. XXX 5. XXX 6. 工作温度： -40~85 °C	1. VF=0.8 V 2. IF=2 * 15 A 3. XXX 4. XXX 5. 工作温度： -55~105 °C	1. VF=0.8 V 2. IF=2 * 10 A 3. 工作温度：-55 ~75 °C
封装	TO-220	SMD-0.5	SMD-0.5
管脚数量	3	3	3
V F	0.49 V	0.8 V	0.8 V
电平特性 1	XX	XX	XX
电平特性 2	XX	XX	XX
-----	-----	-----	-----

2) 测试方案:

根据模块国产化替代应用验证大纲，开展国产化器件替代应用测试验证，验证器件如表 4 所示。二极管 BB 功能性测试原理如图 3 所示。

表 4 XX 模块测试验证器件

序号	进口器件型号	国产器件型号	该器件在本模块的功能与作用	测试方法
1	AA	BB	模块电源切换冗余功能	电源切换冗余功能功能测试

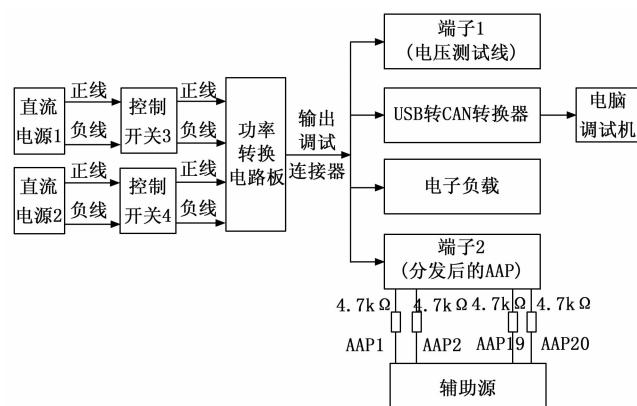


图 3 二极管 BB 功能性能测试原理框图

3) 测试方法和步骤:

(1) 按图 3 接线, 将直流电源输出电压设定为 +28 VDC, 将负载设定为恒阻模式;

(2) 打开直流电源输入源开关, 接通控制开关 3 (即 28V1 输入), 关闭控制开关 4, 通过电子负载观察到 28V1 电压有输出, 此时测量并记录电源的功率板上

二极管 BB 的 A2 引脚与 12 V 辅助源地之间电压, 记为 V2 电压;

(3) 接通控制开关 4 (即 28V2 输入), 关闭控制开关 3, 通过电子负载观察 28V2 电压输出, 此时测量并记录电源的功率板上二极管 BB 的 A1 引脚与 12 V 辅助源地之间电压, 记为 V1 电压;

(4) 最后接通控制开关 3 和 4, 测量并记录二极管 BB 的 V_F 电压。

4) 合格判据

(1) 接通 28V1 输入, 关闭 28V2 输入时, V2 电压应小于 1 V;

(2) 接通 28V2 输入, 关闭 28V1 输入时, V1 电压应小于 1 V;

(3) 接通 28V1 输入和 28V2 输入, 二极管 BB 的 V_F 电压, 测量值应 ≤ 0.8 V。

3.2.3 设备级验证方案

根据系统硬件构架,该模块装入YY设备, BB器件主要实现功能如表5所示,对此功能开展测试,检测BB器件功能是否正常。

表 5 BB 测试器件在 YY 设备功能

序号	国产器件型号	装入模块	验证设备	该器件在本设备的功能与作用	测试方法
1	BB	X模块	YY设备	提供 28 V 直流 低压电源供电	28 V 直流低压电源 供电功能测试

3.2.4 系统级验证方案

根据系统构架，YY 设备属于 WW 系统，保障子系统与航电接口通信功能。测试时对此功能开展测试，检测 BB 器件功能是否正常。

3.2.5 整机级验证方案

根据飞机系统构架, WW 系统安装在飞机内部属于航电系统, 保障飞机与地面塔台通信功能。测试时对此功能开展测试, 检测 BB 器件功能是否正常。

3.3 验证过程

1) X 年 X 月 ~Y 月, 样品编号为 Y001 的二极管 BB 器件在 V 研究所开展器件检测评估, 结论为: 自主可控等级 A 级, 满足国产化要求;

2) X年X月~Y月, 产品编号为001的X验证模块, 完成模块电源切换冗余功能常温功能性能验证, 应力筛选验证, 环境适应性验证(包括高温工作、低温工作、功能振动试验), 可靠性强化试验验证, 该项工作结果正常;

3) X年X月~Y月, X验证模块装入编号为002的YY设备, 完成设备低压电源供电功能常温功能性能验证, 应力筛选验证, 环境适应性验证(包括高温贮存、工作试验, 低温贮存、工作试验, 温度冲击试验,

温度—湿度—高度试验, 湿热试验, 功能振动试验, 耐久振动试验, 功能冲击试验, 低气压(高度)试验, 加速度性能试验), 完成设备级电磁兼容、供电兼容试验验证, 以及可靠性强化试验验证, 该项工作结果正常;

4) X 年 X 月~Y 月, 随 WW 系统完成航电接口通信功能性能验证工作, 该项工作结果正常;

5) X 年 X 月~Y 月, 随 003 号飞机完成了地面任务系统地面塔台通信功能验证测试, 该项工作结果正常;

6) X 年 X 月~Y 月, 随 003 号飞机开展了飞行验证测试, 飞行 XX 起落/累计 XX 小时, 该项工作结果正常。

3.4 验证结论

经器件级验证、模块级验证、设备级验证、系统级验证、整机级验证, 国产 BB 器件达到其技术手册描述指标; 满足本机载产品对此器件的功能性能需求、工作环境需求, 验证结果如下: 国产二极管 BB 器件可用于替换进口器件 AA。

4 结束语

随着当前国际形势的不断变化, 武器装备完全自主可控已成为我国军工行业未来发展的必然趋势。在国家的支持下, 通过元器件行业的预研、型谱、新品、贯标、增长及国产化等渠道, 研制了大批的国产元器件^[21]。虽然当前我国国产元器件在器件设计基础、生产工艺、材料、测试及质量控制等, 与国外先进水平相比存在一定差距^[22]。但通过对元器件开展充分的应用验证, 可以提前暴露和释放安全风险。

在验证方案制定时, 应选择国内具备电子元器件生产完整产业链的大公司产品, 或选择在行业内具备一定知名度的厂家成熟产品, 避免使用国产“伪、空、包”产品进行验证。在验证过程中, 环境试验条件应尽可能探寻电子元器件的边界条件, 如一般军品级电子元器件的工作温度为 $-55\sim+105^{\circ}\text{C}$, 在开展可靠性强化试验时, 探寻器件的边界温度条件可以在此基础上低温 -1°C 为步进逐步下探, 高温 $+1^{\circ}\text{C}$ 逐步上探, 直到器件出现故障或工作不稳定状态, 此时即为器件的边界温度条件。验证结束后, 应对整个验证情况进行汇总, 对不满足验证要求的元器件列入负面清单, 为机载平台其他研制厂家提供参考, 在航空工业领域或其他平台领域共享验证成果。

本研究通过机载平台实例系统阐述了国产化电子元器件替代应用验证的方法, 加速了国产电子器件的工程化应用, 减少了后期装备批量生产质量风险。为其他军工领域如航天、船舶及车辆等相关装备开展国产化替代验证工作提供了详细指导参考。

参考文献:

[1] 郑平. 浅谈计算机网络安全漏洞及防范措施 [J]. 计算

机光盘软件与应用, 2012 (3): 31~32.

- [2] 倪光南. 信息安全“本质”是自主可控 [J]. 中国经济和信息化, 2013 (5): 18~19.
- [3] 马梅若, 倪光南. 未来网络要自主可控 [J]. 中国经济和信息化, 2013 (7): 76~77.
- [4] 杨晨, 商熵. 自主可控是实现安全的必由之路 [J]. 信息安全与通信保密, 2014 (2): 20~21.
- [5] 魏岳江, 严卫东. 自主可控方能不受制于人—国外军方如何保障信息安全 [J]. 信息化建设, 2014 (3): 21~22.
- [6] 裴淳. 一种国产器件替代验证项目的确定方法 [J]. 环境技术, 2020 (1): 76~80.
- [7] 郭彩琴, 路浩天. 航空设备用元器件现状分析及改进措施 [J]. 航空标准化与质量, 2020 (5): 35~43.
- [8] 韩水珍, 孙明, 何桢, 等. 宇航元器件应用验证质量管理体系研究 [J]. 质量与可靠性, 2012, 21 (3): 85~89.
- [9] 范晓明, 权利, 张延伟, 等. 宇航元器件应用验证指标体系构建方法研究 [J]. 电子元件与材料, 2013, 32 (3): 18~22.
- [10] 金春华, 孙明. 宇航元器件应用验证项目风险分析及应对策略 [J]. 质量与可靠性, 2011 (6): 14~17.
- [11] 史玉琴, 周婕, 徐居明, 等. 空空导弹新研元器件可靠性保证方法研究 [J]. 航空兵器, 2014 (2): 61~64.
- [12] 江理东, 孙明, 白凡. 宇航元器件应用验证系统工程 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2019.
- [13] 吴蓬勃. 基于需求工程的国产元器件应用验证技术研究 [J]. 信息通信, 2019, 197 (5): 280~281.
- [14] 江理东, 林立芳, 刘伟鑫, 等. 元器件应用验证技术及其工程实践 [J]. 上海航天, 2021, 38 (3): 189~196.
- [15] 黄斌. 基于国产多核处理器的可重构计算机设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 243~245.
- [16] 唐章东, 张凯, 宁永成, 等. 航天用元器件应用验证方法及其应用实例 [J]. 航天器环境工程, 2013, 30 (5): 296~301.
- [17] 史玉琴, 吴柏林, 苏亚斌, 等. 航空武器装备电子元器件应用验证方法研究 [J]. 电子质量, 2014 (12): 1~8.
- [18] 孙明, 吕文学, 白凡. 宇航元器件应用验证项目管理的理论与实践 [J]. 电子元件与材料, 2011, 30 (12): 65~70.
- [19] 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.
- [20] 柳华光, 张魁, 黄杰. 固态微波功率器件应用验证技术研究 [J]. 电子质量, 2017 (11): 54~57.
- [21] 黄超, 孙淑先. 宇航元器件级应用验证的质量管理 [J]. 质量与可靠性, 2012 (1): 27~31.
- [22] 彭晓飞, 李杰, 刘路扬, 等. 国产航天元器件自主可控应用验证方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (5): 268~273.