

国产航天元器件自主可控应用验证方法研究

彭晓飞¹, 李杰¹, 刘路扬², 苗志坤², 孙宁¹

(1. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 太原 030051;
2. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100089)

摘要: 我国正处于从航天大国成为航天强国的重要阶段, 航天元器件自主可控关系到国家制造能力的提升, 但由于我国国产元器件发展起步晚、技术差、可靠性不高, 因此亟需建立一套较完整的元器件应用验证方法进而加速国产化替代工作; 在此通过对元器件生产过程要素评价、功能性能验证、质量可靠性验证、应用适应性验证等多维度综合评估, 建成面向产品维度、过程维度、体系维度的系统协调、融合开放的质量能力体系; 采用该应用验证体系对国产 ADC 类器件 HWD976 进行测试, 测试结果 SNR 为 74.321 3 dB, SINAD 为 73.652 4 dB, SFDR 为 79 dB, 满足设计之初需求; 该方法为支撑后续国产化替代产品的质量保障和应用可靠性评价提供了理论依据, 加速推动我国航天装备自主可控目标的实现。

关键词: 航天元器件; 国产化; 自主可控; 应用验证; 可靠性

Research on the Verification Method of Autonomous Controllable Application of Domestic Aerospace Components

PENG Xiaofei¹, LI Jie¹, LIU Luyang², MIAO Zhikun², SUN Ning¹

(1. North University of China Key Laboratory of Electronic Testing Technology for National Defense Science and Technology, Taiyuan 030051, China;
2. Aerospace Science and Industry Defense Technology Research and Test Center, Beijing 100089, China)

Abstract: China is in an important stage from a large Aerospace country to a powerful Aerospace country. The autonomy and controllability of aerospace components is related to the improvement of national manufacturing capacity. However, due to the late start of the development of domestic components, poor technology and low reliability, it is urgent to establish a complete set of component application verification methods, so as to accelerate the localization and substitution work. Here, through the multi-dimensional comprehensive evaluation of component production process factors, functional performance verification, quality reliability verification and application adaptability verification, a system coordinated, integrated and open quality capability system oriented to product dimension, process dimension and system dimension is established. The application verification system is used to test the domestic ADC device hwd976. The test results show that the SNR is 74.321 3 db, SINAD is 73.652 4 db and SFDR is 79 dB, which meets the requirements at the beginning of the design. This method provides a theoretical basis for supporting the quality assurance and application reliability evaluation of subsequent domestic alternative products, and accelerates the realization of the goal of independent control of China's aerospace equipment.

Keywords: aerospace components; localization; autonomous and controllable; application validation; reliability

0 引言

在航天装备中, 国产化元器件的应用比例不高, 关键元器件仍大量依赖于进口产品, 这严重影响了航天设备的自主保障能力^[1]。我国电子元器件生产起步较晚, 在设计初期, 主要采用借鉴、引用和集成创新等思维模式, 存在不理解原理只单纯追求产品形似神似的情况, 从而忽略基本的设计原理和需求, 导致后续应用存在潜在的风险^[2-3]。

另外, 也有很大一部分元器件虽然采取的是正向的设计, 但由于对国外的设计原理的理解不透彻、技术掌握不到位, 使得无法完全独立自主设计。

元器件国产化替代在我国虽然得到了长足的发展, 但由于缺乏统一的标准, 各单位执行力度不一, 许多国产元器件并未通过大量的应用验证^[4]。在使用元器件前没有掌握其在未来使用环境或应用设计方案中的功能和性能, 也没有对实际使用中的元器件性能指标进行评估, 因而无法

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-03-16。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973280); 国家自然科学基金青年基金项目(62003316); 中国博士后基金面上项目(2019M661069)。

作者简介: 彭晓飞(1997-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事微惯性测量、国产元器件应用验证方向的研究。

李杰(1976-), 男, 山西岚县人, 教授, 博士生导师, 主要从事制导与控制研究、组合导航与智能导航及智能信息处理方向的研究。

引用格式: 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.

得知元器件在实际使用时的功能性能表现。此外,在验证过程中无法模拟实际的应用环境,也会导致元器件的潜在问题不能得到充分暴露,若直接应用到航天装备中,可能存在较大的风险^[5]。

要想彻底解决这些问题,就亟需建立一套通用的应用验证体系,有组织的开展国产化元器件替代应用验证工作,以此来满足同类型大批量元器件的通用化验证需求,为后续型号应用提供成型的系统化的验证方法和流程设计,降低国产化验证复杂度,减少重复验证流程,为研制单位提供有效且实用的验证数据,充分保障质量,提高国产化替代水平^[6-8]。

1 元器件自主可控

“自主可控”要求将核心元器件、核心技术、关键原材料等方面掌握在自己手中^[9]。通过自主的设计和开发,掌握产品的核心技术,实现产品在设计、开发、生产、维护、升级等过程中的完全可控。自主可控是指制造商和服务提供商具有技术能力和知识产权,并掌握产品技术的发展方向^[10]。对于主权国家,必须要求核心元器件、核心技术和配套软件的自主性和可控性,对于必须使用进口技术产品的领域应达到风险可控。

我国元器件研制生产受自身各种客观条件的限制,从而使绝大部分仿制元器件无法与进口元器件相媲美,在设计、材料和工艺等方面不能完全保证一致^[11]。此外,国产元器件参数系统设置不完善、性能指标测试覆盖不完整,即便是测试合格的产品,在使用时也会出现各种各样的问题。同时,我国新研制的电子元器件在设计开发、制造封装、测试评估、应用验证方面没有系统性的指导文件,也就是顶层管理文件不完善,造成无法对国产化元器件的替代工作进行有效的监督和落实^[12]。

为实现自主可控的目标,保障元器件的国产化替代,必须从元器件生产过程中所用到的知识产权、材料、技术等方面同步推动。应建立更加完善的系统管理机制,引导研制单位对主流器件进行国产化替代;加大专项资金支持,促进器件应用单位与设计单位的合作交流,开展联合研究,开展应用验证^[13]。确保器件稳定供货,无隐患,最终实现元器件自主可控的宏伟目标。

2 元器件应用验证方法探讨

元器件在应用之前,通过开展一系列测试、评估和评价,综合判断并确定元器件研制的成熟度以及工程应用的适用度,这就是元器件的应用验证^[14]。不仅能够有效的指导元器件产品合理化、成熟化,还可保障新研制的元器件其可靠性、实用性和适宜性,以提高元器件的上装率^[15-16]。

元器件的应用验证是国产化元器件的替代工作过程中必要且关键一环^[17]。应用验证具体包括4个阶段,即生产过程要素评价、功能性能验证、质量可靠性验证和应用适用性验证。根据应用验证项目,充分考虑各层级准备周期、仪器设备资源、样品数量、试验周期等,建立验证试验项目逻辑关系,通过合理设计试验项目的串行、并行关系,

实现验证工作效率和效益的最大化,根据确定的验证项目和准备的试验样品情况,验证工作采用板卡级验证和器件级验证并行开展的方式^[18]。图1详细展示了元器件的基础验证技术流程。

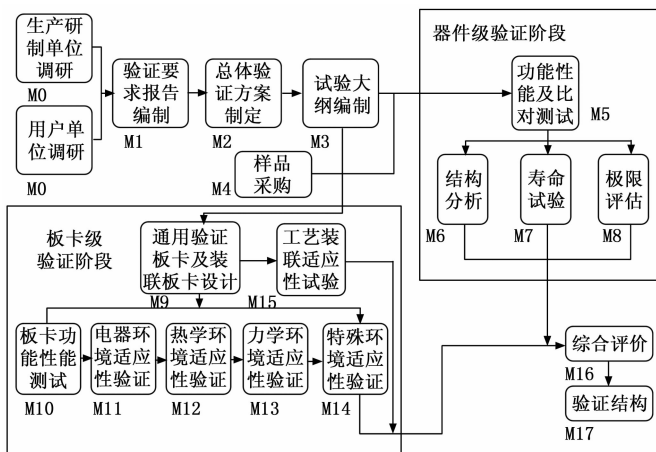


图1 基础验证技术流程图

2.1 生产过程要素评价

元器件生产过程要素评价目的是通过对验证器件研制厂家调研评估,对元器件的过程控制、制造和工艺、设计能力以及自主可控能力进行评价,提前识别短板与风险,保障后续供货的稳定可靠。在生产要素指标分配方案中,重点关注该器件的国产化自主可控能力。评价指标中与自主可控相关的指标权重占比较大。具体涵盖如下:

2.1.1 过程控制

元器件的生产过程控制能力对元器件批次一致性及可靠性保证具有重要意义,主要确保器件长期稳定可控,同时对相关设备、关键工序、材料、生产人员等进行评价^[19]。

2.1.2 制造与工艺

主要通过器件的生产制造过程和成品器件的结构特点对其进行评价:①元器件生产线是否有稳定的流片能力;②封装生产线的自动化程度如何以及是否是在国内进行;③产品是否已经稳定应用。

2.1.3 设计能力

设计能力主要包含设计团队经历、单位元器件设计能力、封装管壳设计能力、设计文件的规范性与完备性等内容。

对设计团队人员组成、在岗时间、团队规模、团队成员支撑、设计经验等进行考核;主要关注元器件设计版图、仿真资料等过程文件,同时考核同类型元器件的历史设计应用情况;设计规范文件中考察产品设计流程管理记录、规格文档、整体设计方案及迭代文件等;同时考察封装管壳设计能力^[20-21]。

2.2 功能性能验证

表1列出了功能性能验证的一些基本验证项目,如功能性能测试、关键参数特性曲线测试、比对测试与分析以及电性能参数极限评价等各项试验,综合这些验证实现元器件的器件级验证。

表 1 功能性能验证项目

验证项目	验证层级	验证目的
功能性能测试	器件级	验证国产元器件功能、性能实际指标与规范要求的符合性,并确定能否覆盖用户对器件的功能性能需求。依据该器件的详细规范以及该器件的应用要求报告来测试。
关键参数特性曲线测试	器件级	曲线绘制主要通过测试国产器件的一些关键和核心参数随所施加电源电压、输入电压、频率、负载、温度等应力的变化情况,并将这些变化情况以图表形式给出,供设计师使用参考,指导选用设计。
比对测试与分析	器件级	对标进口器件的关键参数,通过资料比对或实测比对的方式对国产元器件与进口元器件的关键参数差异性进行比对分析,指导国产化替代工作。
电性能参数极限试验	器件级	评价器件可以正常工作的极限电源(最高和最低)电压,检验器件在极限工作电压下的功能指标是否满足要求。
ESD 试验	器件级	考核器件的抗静电能力。按照 GJB548B-2005 方法, HBM 模型, 试验电压 2 000 V, 试验完成后进行电性能测试, 判断功能性能是否异常, 记录测试数据。
高低温极限试验	器件级	对器件所能承受的最高、最低工作温度进行评价, 主要检验器件在高温下的功能指标是否满足要求。
温度循环试验	器件级	评价器件承受极端高温与极端低温交替变化的能力。
热冲击试验	器件级	评价器件抗热冲击的规范极限, 包括最高温度和最大冲击次数。
机械冲击试验	器件级	用于评估器件在正常和极限温度下, 受到一系列冲击时, 器件性能是否失效。
恒定加速度试验	器件级	主要用于评价器件在使用状态承受高加速度应力的能力。

2.3 质量可靠性验证

2.3.1 结构分析

目的是评价元器件的设计、工艺和材料等能否满足可靠性要求以及相关型号装备应用要求的能力^[21]。通过结构分析尽可能避免存在结构缺陷的元器件被应用于型号装备。原则上, 鉴定试验和批质量一致性检验中已开展的可靠性试验(如可焊性、引线牢固性等), 结构分析对其试验数据进行采信。同时, 针对同一生产厂家相同封装工艺的元器件, 选取一个典型器件进行工艺和材料分析。

2.3.2 结构单元分解

元器件结构主要由四部分组成, 如图 2 所示, 分为封装管壳、键合互连、芯片焊接和芯片结构。

2.3.3 结构要素识别

根据其型号需求, 对器件进行结构要素识别, 并结合同类器件的失效案例和应用环境与要求, 了解常见结构的失效模式, 具体如表 2 所示。

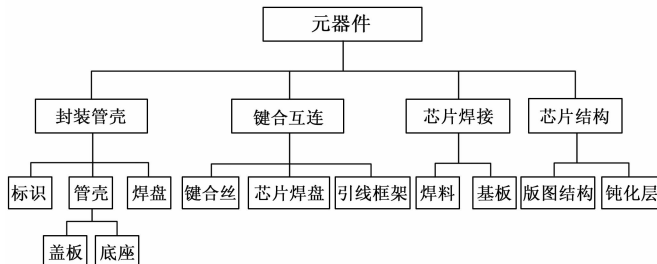


图 2 器件结构分析框图

表 2 器件结构要素组成

结构单元	结构评价要素	分析试验方法	
封装管壳	标识	外部目检	
	管壳	盖板、底座基材及镀层	制样镜检、扫描电镜检查、镀层厚度测量、能谱分析
		封装密封性	密封检测
		管壳尺寸	外形尺寸
	引出端	引出端基材	制样镜检、扫描电镜检查、镀层厚度测量
引出端镀层		镀层厚度测量	
引出端尺寸		外形尺寸	
键合互连	内引线材料和尺寸	X 射线检查内部目检	
	内引线布局、弧度		
	键合强度	键和强度试验	
元器件粘接	内引线材料、内电极结构的匹配性	制样镜检	
	器件尺寸和划片质量	X 射线检查内部目检	
	器件安装位置及方向		
	器件粘接材料及工艺	X 射线检查、能谱分析	
元器件结构	器件粘接牢固度	剪切强度试验	
	钝化层	钝化层完整性、扫描电镜检查	
	版图结构	内部目检	

2.3.4 结构分析试验流程

元器件结构分析试验流程, 如图 3 所示。

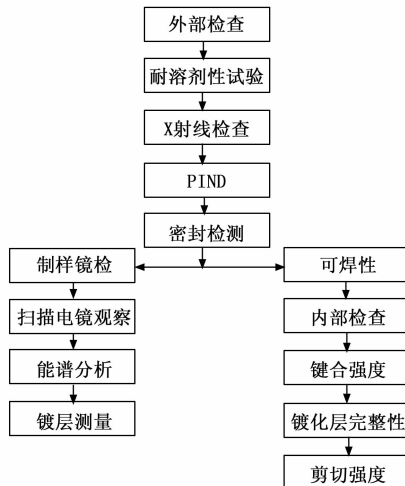


图 3 器件结构分析试验流程

2.4 应用适应性验证

应用适应性与用户实际应用结合最为紧密, 主要通过

分析用户提出的应用条件、系统功能实现、环境要求等, 制定能够考核到用户关注内容的指标。应用适应性验证项目如表 3 所示。

表 3 应用适应性验证项目

验证项目	验证层级	验证目的
装联适应性验证	板级	验证器件对现有成熟装联工艺的适应性, 指导后续装配使用。
板级功能验证	板级	依据器件详细规范、对标进口器件资料验证器件在通用板卡状态下, 典型的板级功能是否正常, 指导后续设计使用。
工作稳定性测试	板级	验证器件在典型应用电路下, 在高温、常温、低温条件下长时间的工作稳定性。
电源电压拉偏测试	板级	验证器件在典型应用电路下, 对电路上的浪涌、负载变化等电气环境变化的适应性, 评估器件的电器环境适应能力。
温度循环试验	板级	结合器件的实际应用需求, 验证在不同温度变化条件下的适应表现, 评估器件的热学环境适应能力。
随机振动试验	板级	验证器件在不同随机振动条件下的适应表现, 评估器件的随机振动环境适应能力。
机械冲击试验	板级	验证器件在不同冲击条件下的适应表现, 评估器件的冲击环境适应能力。
盐雾试验	器件级	验证器件在盐雾环境条件下的适应表现, 评估器件的盐雾环境适应能力。
湿热试验	器件级	验证器件在湿热环境条件下的适应表现, 评估器件的湿热环境适应能力。

2.4.1 总体设计方案

在进行应用适应性验证时需要硬件设计母板控制板, 验证子板及其与工控机和设备的连接关系的设计。同时, 母板以 FPGA 作为核心器件, 其主要完成对高性能 A/D 转换器输出数据的采样, 并为高性能 D/A 转换器提供高速测试激励向量, 同时完成数据的缓存、数据的跨时钟域处理, DDR3 SDRAM 高速数据读写控制, 以太网和光纤接口协议实现及数据传输等功能, 并且 FPGA 片内已集成 JESD204B 标准的收发接口, 为高性能 A/D 和 D/A 转换器的数据采样和发送提供了极大的便利。

基于 Kintex-7 的 A/D 和 D/A 转换器测试系统总体方案如图 4 所示。

图中的同步动态存储器 DDR3 SDRAM 在系统中作为 A/D 和 D/A 转换器的数据存储空间, 其最大吞吐速度可以达到 1.6 Gbps, 最大 2 GB 的容量, 这为 ADC 数据的大容量存储和 DAC 测试激励向量的高速输出提供了良好条件, 也保证了数据在 K7 与 PC 之间的高速传输和下载。

2.4.2 详细设计阶段

完成 ADC 静态参数和动态参数的测试需要辅助仪器, 如信号发生器、高精度万用表、示波器、频谱分析仪、高精度电源等。这些信号源具有出色的性能(低相位噪声、平坦的频率响应、适度的谐波性能)。由于这些发生器的谐波功率一般不如特定 ADC 固有的线性度那么好, 因此在信号发

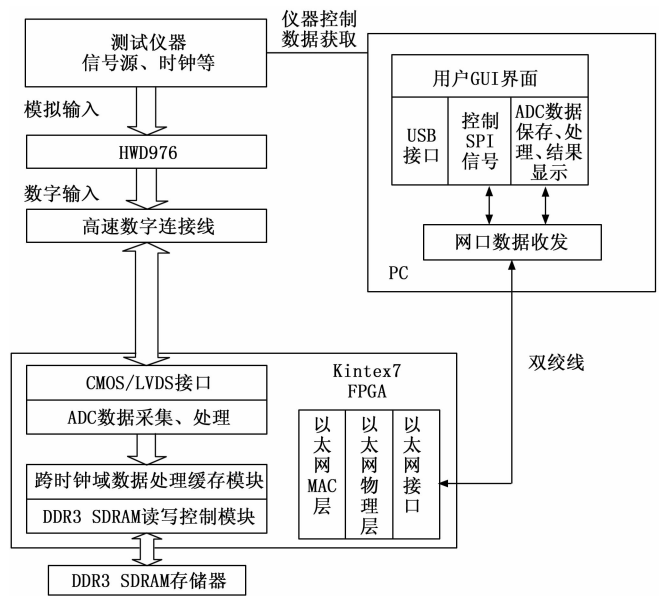


图 4 测试平台实现总体方案图

生器与 ADC 模拟输入之间需要进行滤波处理。如图 5 所示。

1) 子板设计:

子板设计在 $-55 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内正常工作, 保证在高低温测试、温度循环测试以及力学环境测试等试验中工作良好。对于控制板和子板、控制板与设备、子板与设备之间的连接选择高质量的连接器材。

考虑数字信号线长度对信号传输的影响和被验证器件自身数字接口的驱动能力, 采用子板增加驱动电路、信号转换电路等方式与验证母板连接, 保证传输的可靠性, 避免误判操作; 与子板相关的连接线缆均选用能承受 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的线缆, 保证在高温测试和温度循环测试以及力学环境测试等试验中工作良好; 对于数字控制信号, 可以采用排线进行传输, 且长度不宜过大; 对于模拟信号, 要保障传输的效果, 减少噪声的引入; 双方接口选择 SMA 接口, 通过同轴电缆进行连接。子板设计如图 6 所示。

2) 母板设计:

通用数据处理板卡主要完成 ADC 数据的预处理, 将预处理的数据发送到上位机, 上位机接收到数据后, 对数据进行运算处理得出 ADC 的静态参数和动态参数; 并将数据存入数据库。母板的设计框图如图 7 所示, 母板的核心是一个 FPGA 芯片, 用于产生测试的图形激励。FPGA 的供电模块保证 FPGA 的正常运行, 连接器的资源主要包括控制切换通道、数字通道、差分通道的高速连接通道, 这些通道都由主控 FPGA 控制, 完成相关的功能, 通讯功能主要是用串口进行承接。

由于 AD 任务包中器件类型多样、厂家应用电路不同、功能存在差异、封装各异、性能指标不同、测试项目繁多、应用环境复杂等问题, 平台设计需满足兼容性、综合性、实用性等实际要求。通用验证平台可高效、准确的采集、存储、分析数据, 将数据以波形、数字等形式直观、有效

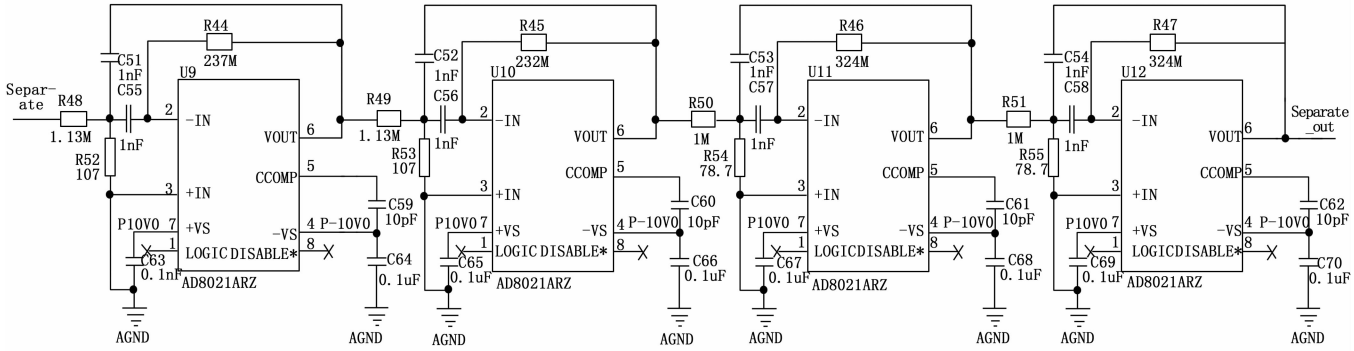


图 5 基于运算的带通滤波器

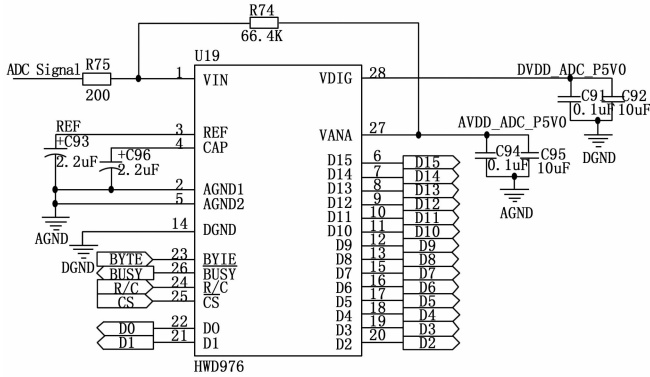


图 6 子板设计原理图

号, 并连接固定频率的滤波器至 HWD976 模拟输入端;

4) 利用逻辑分析仪/专用控制母板控制 HWD976 进行动态转换, 并采集器件数字输出信号;

5) 通过上位机软件将采集的数据进行 FFT 变换, 得到频域信息, 并绘制出结果的频谱图形如图 8~9 所示。

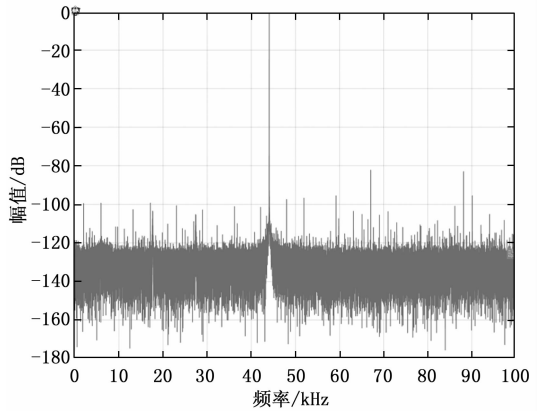


图 8 板卡 1: 25 °C 温度下功率谱

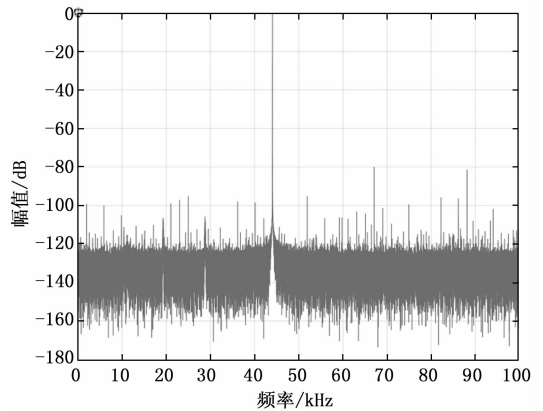


图 9 板卡 2: 25 °C 温度下功率谱

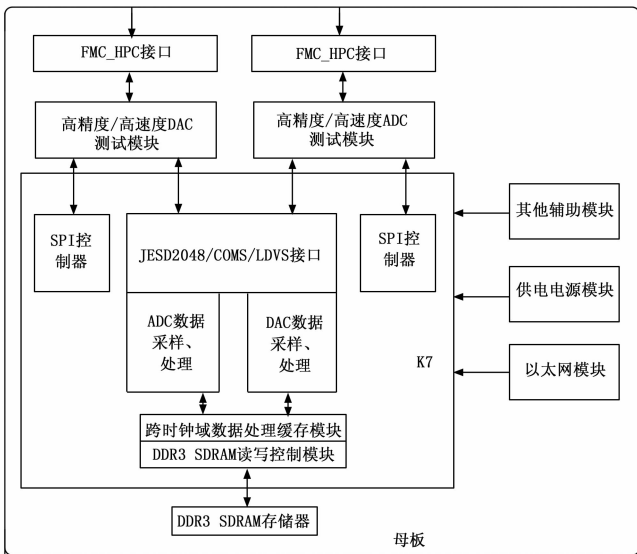


图 7 母板结构

地反映给客户, 并将数据存储在数据库, 为高效、准确的对 AD 转换器的应用特性作研究提供有效的依据和保障。

2.4.3 试验验证

1) 将 HWD976 待测板卡置于规定的环境与直流电源、专用控制母板连接; 输入高精度的正弦波 $f_{IN} = 45\ 056.152\ 343\ 75\ \text{Hz}$, 其采样频率设为 $f_{SAMPLE} = 200\ \text{kHz}$;

2) 接通电源, 给定器件电压、模式控制引脚电压, 将器件数字输出通过高速接口连接至数字采集端;

3) 通过高性能射频信号源提供特定频率的模拟输入信

利用 FFT 变换结果, 通过公式计算得出 SNR、SI-NAD、SFDR 等动态指标如表 4。

3 元器件验证过程控制要求

3.1 验证过程异常处理

3.1.1 验证试验中断处理

在测试过程中, 如果测试条件改变不能符合试验要求时, 则应中断测试, 待满足条件后继续测试。当测试中断前

表4 动态指标测试结果

动态指标	Standard values in Datasheet	测试结果	
		板卡 1 25℃	板卡 2 25℃
SNR	75 dB (Min)	板卡 1 25℃	74.512 8 dB
		板卡 2 25℃	73.423 5 dB
SINAD	75 dB (Min)	板卡 1 25℃	73.289 7 dB
		板卡 2 25℃	72.378 2 dB
SFDR	81 dB (Min)	板卡 1 25℃	79.547 5 dB
		板卡 2 25℃	79.536 2 dB

的测试条件未超出规定的范围,则中断前的测试有效,否则将重新进行测试。

当出现以下情况时,则应中断测试:

- 1) 在测试过程中,试验装置因技术状态或质量问题危及安全,无法保障测试安全;
- 2) 影响性能和使用的关键技术问题;
- 3) 出现短期内不能排除的故障;
- 4) 因不可抗拒因素,无法满足测试条件。

3.1.2 样品异常情况处理

- 1) 验证项目中出现元器件样品失效,应标识、隔离,填写故障记录表,并由试验分析团队进行失效分析;
- 2) 验证项目中出现元器件样品参数非预期超差,应对参数超差现象提供便于追溯的支撑性素材,以便后续分析;
- 3) 对于元器件失效和参数超差问题,由应用验证专业机构、器件用户单位和研制单位共同分析、定位和处理,并记录形成问题清单。

3.1.3 仪器、设备故障处理

- 1) 分析故障对被验证元器件的样品的影响;
- 2) 修复故障的仪器设备并进行检定合格,或更换同类合格设备;
- 3) 若仪器、设备故障对被评价元器件样品无影响,使用修复或更换的仪器设备继续试验;若有影响,则更换被评价元器件样品后使用修复或更换的仪器设备重新试验。

3.2 验证试验数据处理

在测试过程中,应及时、准确、完整地获取测试信息并填写测试数据表(必要时采集视频或图像信息)。测试数据应准确可靠,不得随意取舍,对所采集的数据进行收集、分类、整理和存档,并组织相关专业人员对测试数据进行统计分析,根据分析结果科学、公正、客观的进行测试评价。

4 结束语

随着当前国际形势的不断演变,航天元器件自主可控已成为我国航天领域未来发展的必然趋势。虽然航天元器件在国产化过程中存在诸多问题,且与进口元器件相比存在明显的劣势,但通过对元器件采取充分的应用验证,包括从器件微观结构到板卡、组合/整机、分系统/系统多个层级,可以提前暴露和规避国产元器件存在的安全风险。通过构建面向各类航天元器件的应用验证指标体系和赋权方法,能够全面提升航天元器件的质量可靠性保障能力,

实现航天装备的自主可控水平,支撑国家航天产业升级,从而推动航天防御事业高质量发展。

参考文献:

- [1] 周鹏,庄成波. 国产核心电子器件在军用通信系统的应用验证方法研究[J]. 通信与信息技术, 2021(3): 36-39.
- [2] 吴振广,白郁,孙海钦. 国产航天元器件的可靠性分析[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(3): 20-21. 2096-4455.
- [3] 廖勇,袁圆. 进口元器件自主可控的风险分析及对策建议[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(6): 14-18. 1001-2028.
- [4] 谷成. 基于FMEA的国产元器件应用可靠性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] 张群. 航天关键国产化元器件应用验证技术研究[C] // 第五届航天电子战略研究论坛论文集(微电子专刊), 2018: 36-38, 47.
- [6] 李永梅,李先亚,周传祥. 军用进口电子元器件的国产化替代验证典型案例[J]. 质量与可靠性, 2017(5): 30-33.
- [7] 张静,庄成波. 国产核心电子器件应用效果评估方法[J]. 通信与信息技术, 2021(2): 37-40.
- [8] 蔡远文,程龙,辛朝军,等. 航天装备测试技术现状与发展[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 1-4, 28.
- [9] 苏磊,董磊,刘泓,等. 航天元器件自主可控工作推进与实施[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(2): 27-30.
- [10] 吴昊,窦晓彤. 基于自主可控目标的电子元器件工作方法研究[C] // 2019年船舶电子自主可控技术发展学术年会论文集, 2019: 95-98.
- [11] 王香芬,高成,付桂翠. 航空国产新研电子元器件应用瓶颈研究[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(1): 54-58.
- [12] 孙哲煜,张俊杰,朱英玮. 宇航用DA转换器国产化验证技术研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(7): 94-99.
- [13] SCOTSDALE A. China IC markets vs China IC production trends[R]. IC Insights, Inc. 2019.
- [14] 刘增波,刘宗玉,张强. 载人航天器系统测试智能通用化数字接口设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(5): 1675-1677.
- [15] 刘艳,陈江攀,刘艺,等. 导弹装备自然环境试验现状及建议[J]. 现代防御技术, 2021, 49(4): 86-90+106.
- [16] 倪光南,朱新忠. 自主可控关键软硬件在我国宇航领域的应用与发展建议[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 30-34.
- [17] 王玉珍,康志远. 航天电子元器件可靠性设计与分析[J]. 科技创新导报, 2018, 15(9): 13-14.
- [18] 郑磊. 电子设备企业元器件自主可控推进工作探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016(5): 47-50.
- [19] 朱东济,蔡红维,欧阳霄,等. 基于AHP、灰色关联法和TOPSIS的航天测控装备评估模型研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 240-244, 255.
- [20] 马珂,许实清,白乃贵. 新研电子元器件应用验证方法探讨[J]. 环境技术, 2020, 38(2): 46-48, 51.
- [21] 付婉月,江理东,王敬贤,等. 型号用元器件应用验证概念及关键问题的研究[J]. 质量与可靠性, 2019(6): 31-35.