

星载数模转换器抗辐射性能评估测量系统研制

刘小敏 姜慧强 王志宇 刘 童 陈 华 王立平 郁发新

(浙江大学 航空航天学院 杭州 310027)

摘要 基于面向仪器系统的外围组件互连扩展(Peripheral Component Interconnection extensions for Instrumentation, PXI)平台,提出并实现了一个高精度、高速、全自动星载数模转换器抗辐射性能评估测量系统。该系统采用开尔文四线法和均值滤波算法对芯片电流与电压进行高精度监测,利用软件配置矩阵开关全自动切换参数测量项,使用 PXI 总线同步与触发模式控制实现模块化仪器间的高速响应,并使用三次样条算法准确提取单粒子饱和截面与线性能量传输值阈值。基于该系统对一款自主研发的星载数模转换器进行辐照试验,试验结果表明研制的系统能够准确、高效地评估出器件抗辐射性能。系统电压识别精度为 $0.1\mu\text{V}$,最高可支持 24 位数模转换器监测,单粒子效应电流变化与寄存器翻转监测频率分别为 50 Hz 与 100 Hz,总剂量效应时单次表征参数遍历时间为 8 s。

关键词 数模转换器,总剂量效应,单粒子效应,LabVIEW

中图分类号 TL8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110401

Development of radiation tolerance evaluation and measurement system for spaceborne D/A converter

LIU Xiaomin JIANG Huiqiang WANG Zhiyu LIU Tong CHEN Hua WANG Liping YU Faxin

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract Background: The digital to analog converter (DAC) used in space-borne electronic system is unavoidable to be affected by the radiation, and it is essential to evaluate the DAC performance before formal application. **Purpose:** This study aims to develop an automatic measurement system of high-accuracy and high-speed for radiation-tolerance evaluation of space-borne D/A converters. **Methods:** Based on the peripheral component interconnection extensions for instrumentation (PXI), Kelvin (4-wire) method and mean filtering algorithm are applied to accurately monitor the voltage and current of the DAC chip, and a switch matrix configured in software is adopted to automatically switch over measurements of different parameters. Meanwhile the PXI bus synchronization and trigger mode control are used to achieve high-speed response among modular instruments, and the cubic spline algorithm is performed to accurately extract the single event saturated cross section and linear energy transfer threshold. **Results:** The identified voltage precision is $0.1\mu\text{V}$, and the DAC monitoring precision is up to 24 bit. In single event effects evaluation, the monitoring frequency of current variation and register upset are 50 Hz and 100 Hz respectively, and for total dose effect evaluation, only 8-s ergodic time are needed to measure all characteristic

国家自然科学基金(No.61401395、No.61604128)、中央高校基本科研业务费专项(No.2016QNA4025、No.2016QN81002)、浙江省教育厅科研项目(No.Y201533913)资助

第一作者: 刘小敏, 男, 1991 年出生, 2014 年毕业于浙江工业大学, 现为硕士研究生, 研究方向为集成电路设计与测量

通信作者: 陈华, E-mail: chenhu@zju.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61401395, No.61604128), Basic Scientific Research Business Expenses of Central University (No.2016QNA4025, No.2016QN81002), Zhejiang Provincial Department of Education Research Project Funding (No.Y201533913)

First author: LIU Xiaomin, male, born in 1991, graduated from Zhejiang University of Technology in 2014, master student, focusing on the integrated circuit design and measurement

Corresponding author: CHEN Hua, E-mail: chenhu@zju.edu.cn

收稿日期: 2016-04-14, 修回日期: 2016-08-26

parameters. **Conclusion:** The designed measurement system can evaluate the performance of space-born DAC fully automatically and efficiently with high precision, which is a reference solution to such similar research.

Key words Digital to analog converter, Total ionizing dose, Single event effects, LabVIEW

随着数字信号处理技术与航天事业的不断发展,高精度数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)广泛应用于空间电子系统中。然而, DAC 在太空中实际工作时不可避免地受到宇宙射线、高能粒子的辐射影响,容易导致电性能恶化、数字逻辑发生翻转,甚至功能失效,对卫星电路控制系统造成巨大损坏,因此很有必要在工程应用前在地面对 DAC 进行抗辐射性能评估。

国内外在电路结构设计、工艺等方面对 DAC 抗辐射加固的研究已开展多年^[1-2],在不同剂量率、试验条件下的 DAC 辐照效应和损伤机理亦有报道^[3-5],但对 DAC 抗辐射性能评估测量系统却鲜有提及。从 DAC 辐照效应研究推断出,目前进行辐照效应试验主要借助于大型综合测试仪,或针对部分芯片建立了以微处理器为核心的分立辐照监测系统^[6-7]。这类监测系统通用性差、成本昂贵、可拓展性不强,无法满足高精度、高速 DAC 的抗辐照性能评估测量需求。

本文在分析 DAC 抗辐照性能评估测量系统需求和综合国内外 DAC 芯片辐照效应监测方法的基础上,提出并实现一套适用于星载 DAC 单粒子与总剂量抗辐射性能评估测量系统,基于外围组件互连扩展(Peripheral Component Interconnection extensions for Instrumentation, PXI)总线并借助模块化仪器与虚拟仪器技术,采用开尔文四线法和均值采样算法高精度监测芯片电流与电压,软件配置矩阵开关全自动切换参数测量项,使用 PXI 总线同步与触发模式控制达到模块化仪器间的高速响应,并采用三次样条算法准确抽取反应单粒子敏感性的关键参数,开发抗辐照性能评估测量程序与设计应用电路夹具,实现对星载 DAC 抗辐照性能全面、精准、高速评估。并以自主研发的串行数模转换芯片为试验样本,在兰州重离子研究装置(Heavy Ion Research Facility of Lanzhou, HIRFL)重离子加速器、HI-13 串列加速器及 ^{60}Co 试验平台上对 DAC 进行抗辐射性能评估,为后续开展 DAC 辐射效应研究及批次鉴定检验奠定基础。

1 系统原理与组成

1.1 辐照效应与测量系统需求

DAC 主要由译码电路、基准电压源、锁存器、

运算放大器等模拟与数字部分组成,其抗辐射性能主要评估单粒子效应和总剂量效应。

DAC 芯片在重离子照射时,固有的双极性晶体管结构形成可控硅结构,在具备触发信号、寄生三极管处于正向偏置、电流放大倍数足够、电源可提供足以维持锁定状态的电流等条件时,容易产生单粒子锁定^[8],通常表现为电流急剧增大,此外其数字逻辑也有可能发生扰动,产生逻辑翻转等误动作,导致控制偏差。在评估测量 DAC 芯片的单粒子效应时,要求测量系统具备实时高精度在线监测能力和器件保护能力,且满足逻辑翻转监测时所需真空试验环境的接口需求。

总剂量辐射时, DAC 的功能参数(电流、电压等)、静态参数(积分非线性误差、微分非线性误差、增益误差、失调误差等)以及动态参数(无杂散动态范围、信噪比等)会发生退化,是很好的抗辐射性能评估指标。针对目前开展的不同偏置条件、不同剂量率、离线与在线监测等条件的 DAC 辐照效应试验,评估系统应具备表征参数量全覆盖、灵活可拓展、自动高效率化等特点。此外,考虑到测量仪器设备的辐射保护,系统应适用于长距离监测。

1.2 系统构架

基于上述测量系统需求,本文设计的抗辐射性能评估测量系统的整体框图如图 1 所示。该测量系统主要由 PXI 平台上的模块化仪器(矩阵开关 PXI-2510、独立多通道四象限操作源测量单元(Source Measure Unit, SMU)PXIe-4141、高速数字 I/O (High-Speed Digital I/O, HSDIO) PXIe-6545、动态信号分析仪 PXIe-4492 等)、评估测量软件以及 DAC 辐照测量模块等部分组成。其中 DAC 辐照测量模块按照功能划分为单粒子效应测量模块与总剂量效应测量模块,各模块包括 DAC 常见辐照应用电路和系统设备接口,使用 Cadence Allegro 对 DAC 辐照模块进行应用电路与设备接口设计、版图布局布线以及加工制作,实现多个待测对象(Device Under Test, DUT)与测量设备的电气连接,为软件自动选择待测对象与更改电气连接奠定基础。

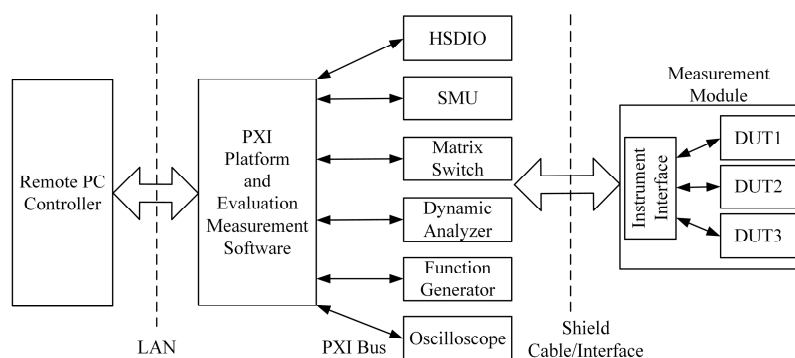


图1 测量系统框图

Fig.1 Block diagram of measurement system.

评估测量软件的架构为“事件+模块化程序”，其流程图如图2所示，系统在初始化后依据评估事件的消息驱动，执行相应的模块化程序，以矩阵开关为核心，全自动监测DAC各项电参数。在完成数据采集后的非事件响应阶段，进行数据处理与参数提取、数据软件前端显示与数据报表存储等，有效减少对CPU及硬件资源的占用。

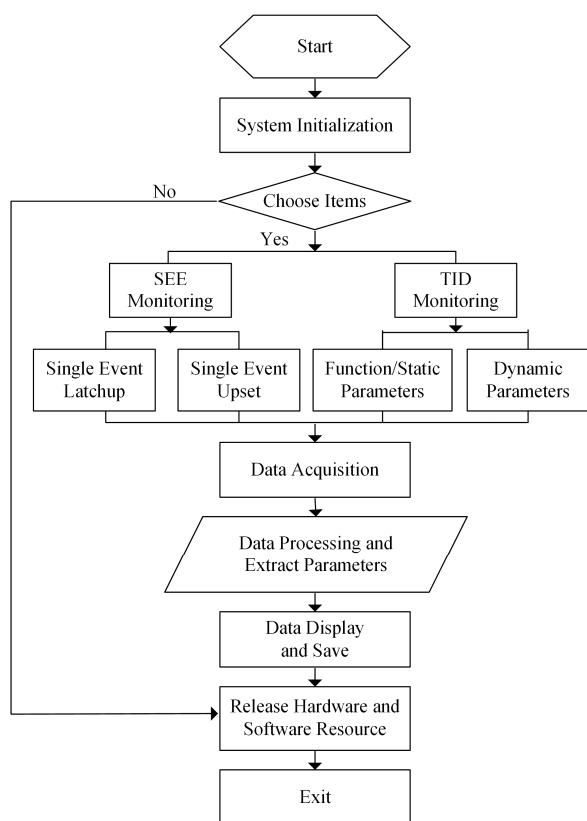


图2 软件流程

Fig.2 Flow chart of software.

辐照测量时，由于DUT置于真空试验环境或长距离试验环境中，测量系统以矩阵开关为核心，实现了仪器与待测对象硬件连接的自动切换，该基于开关矩阵的自动切换辐照测量模式示意图如图3所示。设备与开关通道前端ch[0-68]以及总线busA、

busB相连，多个被测对象与开关通道后端dut[0-67]连接，通道开关的状态由软件配置确定，该结构为设备与被监测对象之间的电信号提供了多种路由方式，简化了系统结构，在无需更改硬件的条件下便可实现软件对多参数、多评估测量对象的监测。

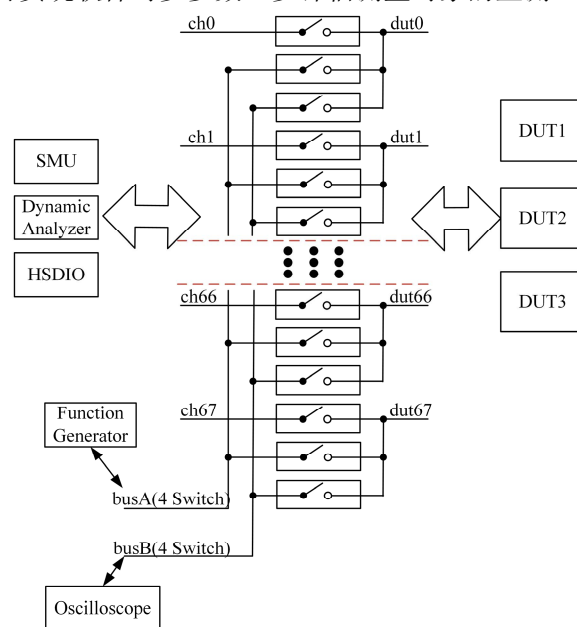


图3 自动切换示意图

Fig.3 Diagram of auto switch.

1.3 单粒子效应评估

单粒子效应监测时，SMU各输出通道与待测芯片电源输入之间采用如图4(a)所示的开尔文连接方式，SMU的4线输出分别独立经过矩阵开关，并在待测芯片电源输入引脚处交汇短接。Force Line与Sense Line之间存在缓冲器，使得前者承载输出而后者监测输出线上电流、电压，对应的软件工作方式如图4(b)所示，程序对SMU进行初始化与用户配置，一旦SMU开启输出后则不断实时监测实际输出情况，若与预期值不一致则对SMU进行输出微调，确保待测对象实际承受的电压为用户设定

值,从而消除电缆与接触电阻对系统供电、监测的影响。数据采集时,由评估测量软件控制 SMU 与 HSDIO 提供芯片所需电源偏置与激励信号,切换开关矩阵以选定待监测芯片,SMU 工作在 4 线模式,以 50 Hz 的频率获取被监测芯片的工作电压、电流。一旦监测到电流超过设定阈值,源测量单元限制输出以保护器件,程序界面报警并完成一次单粒子锁定统计,定时重启上电并继续监测是否再次发生锁定。

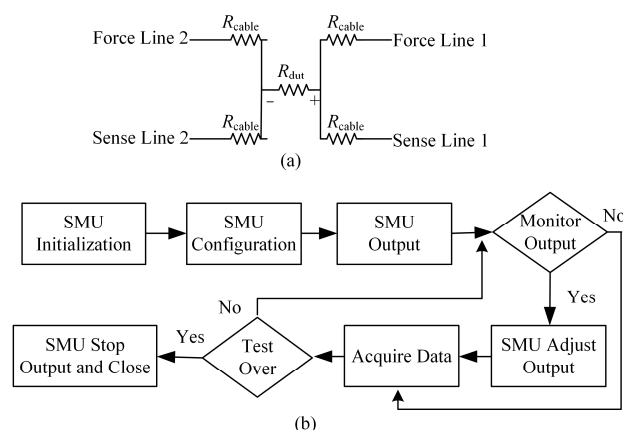


图 4 开尔文接法(a)及在系统(b)中的应用
Fig.4 Kelvin connections (a) and its application in system (b).

若监测芯片结构中含有寄存器，由评估测量软件新开一个线程进行工作，以最快 100 Hz 的频率读、写寄存器，提供翻转动态监测（读取值与非照射芯片返回值比较）与翻转静态监测（循环读取过程中将本次读取值与前次读取值比较）两种模式，评估芯片系统功能失效率和器件本身抗单粒子翻转能力。以翻转静态监测为例，对应第 i 种试验粒子，在初始写入值后循环读取各个寄存器响应值，将本次响应值与前次读取的响应值逐位比较，若值不一致则判定发生翻转，翻转数 N_i 计数一次并统计翻转位所在的寄存器位置，同时定期随机写入新的配置值，全面评估芯片实际工作时的翻转情况。结合用户输入的粒子信息（粒子总注量 ϕ_i 和粒子入射角度 θ_i ），计算出单粒子事件截面 σ_i 以及粒子有效线性能量传输值 $\text{LET}_{\text{eff},i}$ (Linear Energy Transfer, LET) 算法主要依据式(1)、(2)：

$$\sigma_i = \frac{N_i}{\phi_i \times \cos \theta_i} \quad (1)$$

$$\text{LET}_{\text{eff},i} = \frac{\text{LET}_i}{\cos\theta_i} \quad (2)$$

在 i 种($i \geq 5$)粒子试验且 N_i 不为 0 的情况下, 评估测量软件使用三次样条算法拟合出如图 5 所示 σ_i 与 $\text{LET}_{\text{eff},i}$ 的关系曲线, 即在 $i-1$ 个子区间内存在

样条函数($f(x)=ax^3+bx^2+cx+d$), 结合函数在区间内节点连续、边界条件等联立方程组, 采用托马斯法解关于三次样条函数的“矩”的方程组的系数矩阵, 得到各区间的三次样条函数, 依据样条函数提取反应单粒子事件敏感性的关键参数: 单粒子事件饱和截面 σ_{sat} 与 LET 阈值 LET_{th} , 以便后续对空间轨道单粒子翻转率预估等研究^[9-10]。

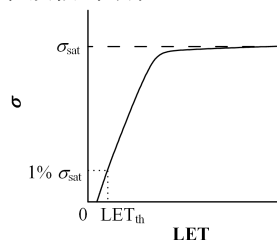


图 5 翻转截面随线性能量传输值曲线
Fig.5 Saturated section vs. linear energy transfer.

1.4 总剂量效应评估

总剂量效应监测时, 程序提供上电、上电+固定码值、上电+全码遍历三种偏置模式, 长距离试验条件下实现 DAC 功能参数的监测, 同时在各剂量阶段对 DAC 进行全部参数短距离条件下的测量。在采集各数字逻辑对应的模拟电压输出时, 使用均值滤波算法, 多采样并剔除最大与最小电压值, 并对其余值取平均, 分析 DAC 表征参数以及偏移量。部分表征参数提取程序框图如图 6 所示, 对于 N 位 DAC, 微分非线性误差(Differential Non Linearity, DNL)为式(4)中 $DNL(n)$ 的最大值, 代表实际量化台阶与对应于 1 LSB (Least Significant Bit) 的理想值之间的最大差异, 积分非线性误差(Integral Non Linearity, INL)为 $DNL(n)$ 的数学积分 $INL(n)$ 的最大值^[11-12], $INL(n)$ 由式(5)给出, 其中 n 为 $0-(2^N-1)$ 范围内数字码值。

$$V_{\text{LSB}} = \frac{V_{\text{out}}(2^N - 1) - V_{\text{out}}(0)}{2^N - 1} \quad (3)$$

$$\text{DNL}(n) = \frac{V_{\text{out}}(n) - V_{\text{out}}(n-1) - V_{\text{LSB}}}{V_{\text{LSB}}} \quad (4)$$

$$\text{INL}(n) = \frac{V_{\text{out}}(n) - V_{\text{out}}(0)}{V_{\text{LSB}}} - n \quad (5)$$

程序在不同测量项时，通过更改图 3 中的 ch、dut、busA/busB 之间的开关状态，可快速满足实际电信号连接需求。此外，在进行 DAC 逐码输出电压采集时，如图 7 所示，高速数字 I/O 作为主设备，动态信号分析仪充当从设备且处于可重触发模式。主设备输出时将它的开始触发信号通过 PXI 总线路由到从设备，从设备在收到触发信号时进行单次采集，然后进入下一次等待触发的状态，直到所有触

发结束后清除任务。该种工作方式能减少系统内响应延迟，同时保证数字信号输出与模拟电压采集的

精准同步，加快单次全参数自动遍历。

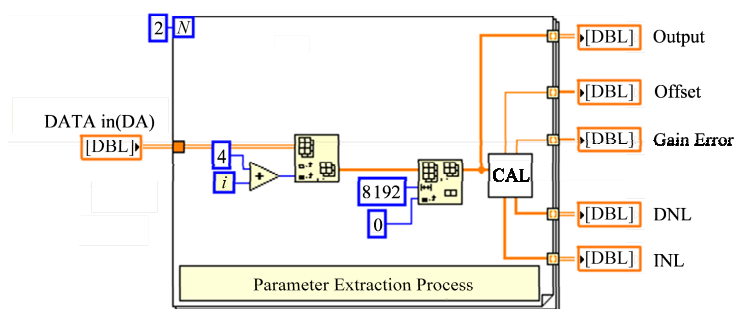


图6 计算部分表征参数

Fig.6 Calculation of partial characterization parameters.

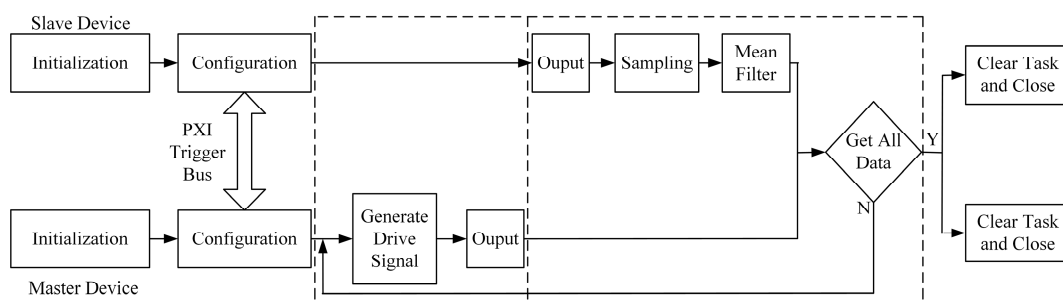


图7 同步与触发

Fig.7 Synchronization and trigger.

1.5 系统实物

通过在PXI平台上开发抗辐照性能评估测量程序与设计应用电路夹具，搭建出系统。评估测量系统软件是在专门为测试、测量和控制应用程序开发而优化的编程环境LabVIEW下完成的^[13-15]，软件

用户界面如图8所示，左侧部分为系统初始配置，包括仪器端口选定、数据存储路径设置、被监测芯片的试验配置等，右侧部分则是评估监测时的所有操作以及数据结果实时显示窗口。图9为系统硬件，包括模块化仪器以及所设计的应用电路夹具。

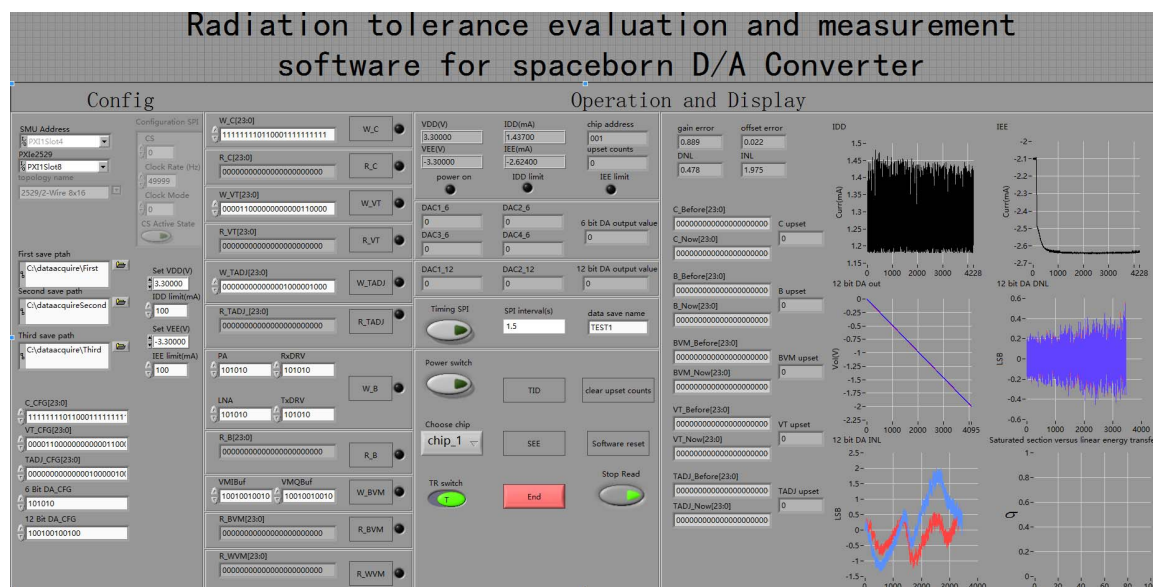


图8 软件用户界面

Fig.8 User interface of the software.

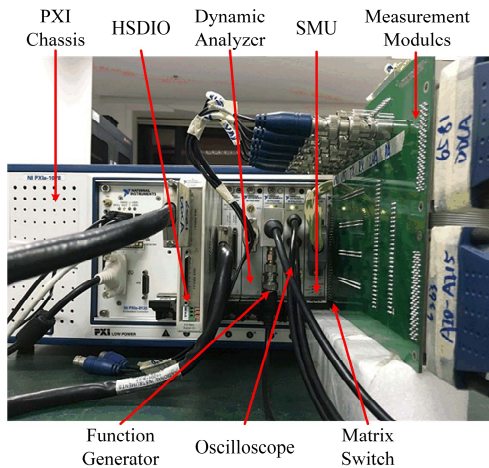


图 9 系统实物图
Fig.9 Photograph of the physical system.

2 系统验证与应用

2.1 系统验证

电压采样精度是系统监测精确度中极重要的一项指标, 使用标准源进行电压输出, 设计的系统与经过计量校验的八位半数字多用表 (Digital Multimeter, DM) Fluke 8508A 进行电压采集, 其中 DM 的测量分辨率为 1 nV, 将两者的采样数据进行比较, 大量统计数据结果如表 1 所示, 表明系统在

± 10 V 量程范围内系统电压采样能识别出 $0.1 \mu\text{V}$ 的抖动, 可满足绝大部分高精度 DAC 的监测需求。

表 1 系统电压测量精度比较
Table 1 Comparison of the voltage measurement precision.

统计区间 Statistical interval / V	最大误差 Maximum error / nV
(-10, -2]	34
(-2, 0]	20
(0, 2]	22
(2, 10)	35

2.2 系统应用

使用研制的系统对自主研发的星载串行数模转换芯片进行抗辐射性能评估, 芯片内部结构如图 10 所示。该芯片使用 SPI (Serial Peripheral Interface) 协议进行通信, 串行接口速率高达 $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 实际工作时该芯片将串行同步码流解码后响应其读写控制命令, 配置相应寄存器可设置 12 位 DAC 输出电压 (输出范围为 $-2 \sim 0 \text{ V}$)。分别在兰州 HIRFL 重离子加速器、北京 HI-13 串行加速器平台上进行单粒子锁定与单粒子翻转试验, 以及在中国计量院 ^{60}Co γ 源试验环境下进行总剂量试验。

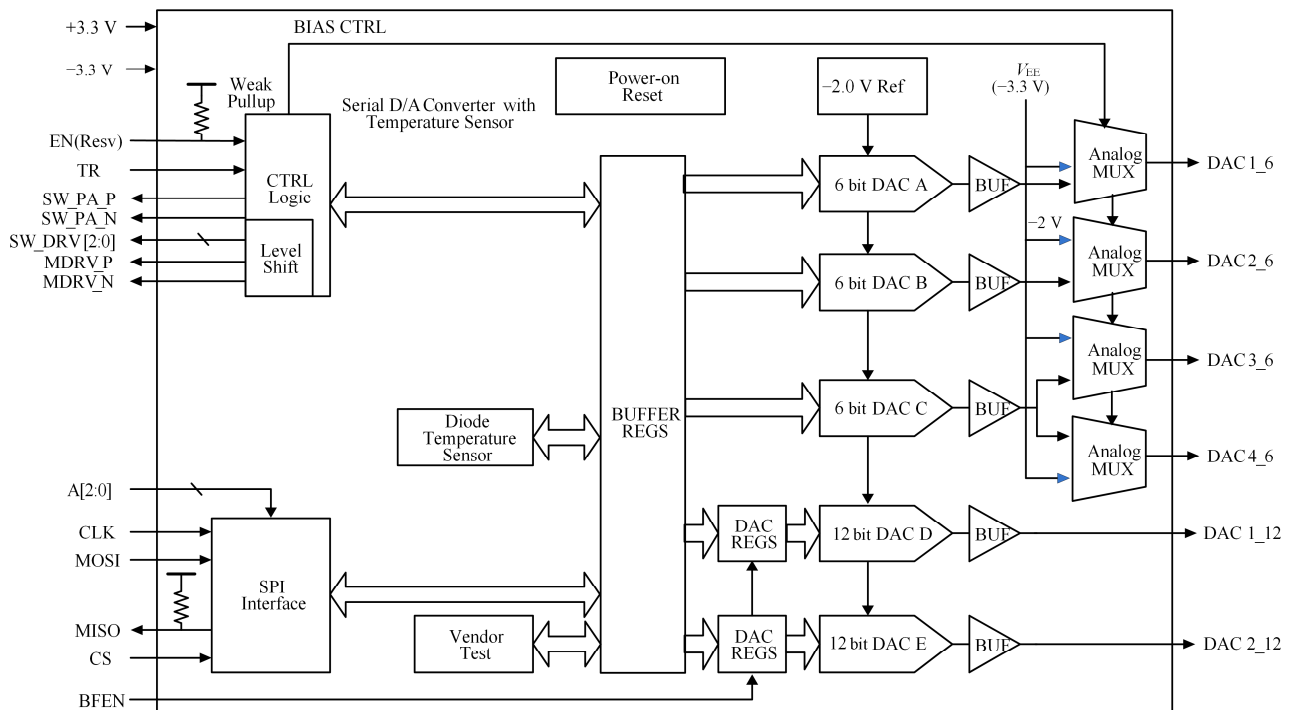


图 10 芯片结构
Fig.10 Architecture of the chip.

2.2.1 单粒子效应评估应用

评估单粒子锁定时，粒子源是 LET 值为 $99.8 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 的 $^{209}\text{Bi}^{31+}$ ，单次粒子总数为 10^7 cm^{-2} 。粒子打击前评估测量系统对 DAC 芯片进行“上电+固定码值”配置，使其全部功能开启。粒子打击期间以 50 Hz 的频率监测芯片正、负工作电流，得到如图 11 所示数据，芯片正、负电流在正常值小幅度上下波动并未出现突然性大幅度增长，且未出现功能失效，可以推断出该芯片未发生单粒子锁定。

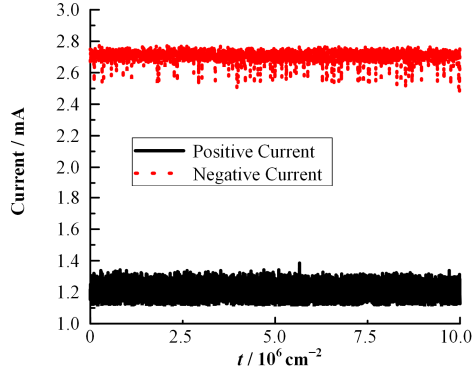


图 11 电流随粒子打击数的变化

Fig.11 The variation of current with the amount of single heavy ion.

进行单粒子翻转试验时，综合考虑芯片设计验证需求与有限的试验机时条件，选用如表 2 所示的重离子，所用重离子均满足硅中射程大于 $30 \mu\text{m}$ 且其 LET 值符合要求。对该款数模转换芯片采用翻转静态监测，从表 2 中可以看出，该款芯片在各重离子源照射下单粒子翻转数较少，小于《宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南》^[16]中所规定的 100 次，满足单粒子翻转 LET 阈值不小于 $15 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 的设计要求。该芯片的良好抗单粒子翻转性能得益于芯片内移位寄存器的特殊加固设计：(1) 双边上电复位结构；(2) 双互锁存储单元的优化，即输入采用分离位线电路结构，输出采用三模冗余结构并对时钟信号进行冗余加固。

表 2 单粒子翻转试验选用的重离子与结果
Table 2 Heavy ions for single event upset experiment and the result.

粒子种类 Particle type	LET / $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$	单粒子翻转数 Single event upset numbers
^{19}F	4.06	0
^{35}Cl	15.0	0
^{74}Ge	37.2	55

2.2.2 总剂量效应评估应用

总剂量辐照时 DAC 芯片采用“上电+全码遍历”偏置，以 $0.5 \text{ Gy}(\text{Si}) \cdot \text{s}^{-1}$ 的剂量率照射至 $1000 \text{ Gy}(\text{Si})$ ，在试验完成后，使用相同的条件对 DAC 进行室温退火试验，研制的系统在各阶段进行监测，该系统单次测量全部功能、静/动态参数的时间为 8 s。如图 12 所示，DAC 的正、负工作电流随着辐照总剂量的累积缓慢增加，照射前后正、负电流分别增大 0.295 mA 、 0.303 mA ，在室温退火时正、负电流逐步回归，最终辐照效应导致的电流损伤变化在 0.2 mA 内，表明该芯片设计中使用环形栅结构和版图隔离技术改善总剂量效应漏电的方法是有效的。图 13 显示 DNL 与 INL 辐照前后变化范围在 3 LSB 内，将两参数在退火后与辐照前的值相比较，发现变化幅度在 1 LSB 内，表明芯片未发生功能失效且内部译码电路未损伤。图 14 为 DAC 在辐照前、后以及退火后的输出曲线，可以发现辐照导致输出曲线斜率发生微小改变，该变化是由 DAC 内部基准电压 V_{ref} 辐照损伤漂移所致。此外，系统结合监测的增益误差、失调误差、信噪比等其他参数在辐照后、退火后的变化值，与评估要求值进行逐一比较，发现该款 DAC 满足抗总剂量效应需求。

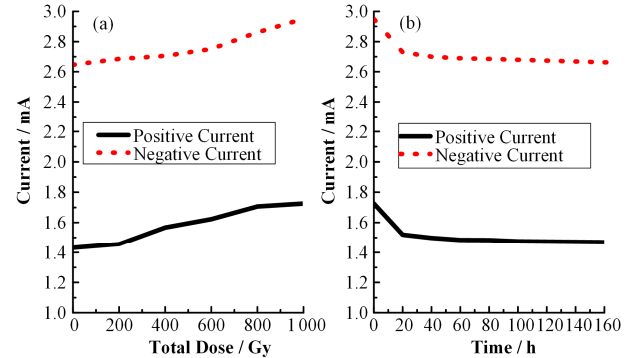


图 12 电流随辐照总剂量(a)和退火时间(b)的变化

Fig.12 The variation of current with total dose (a) and annealing time (b).

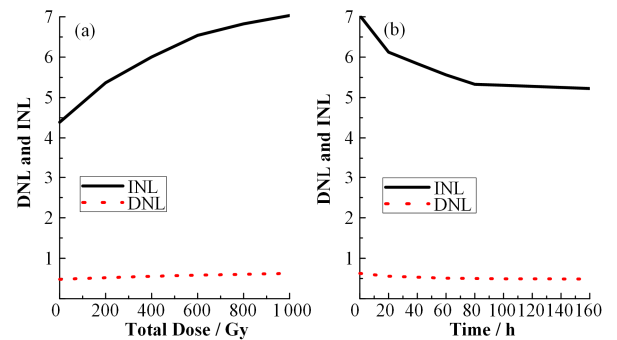


图 13 DNL 与 INL 随辐照总剂量(a)和退火时间(b)的变化

Fig.13 The variation of DNL and INL with total dose (a) and annealing time (b).

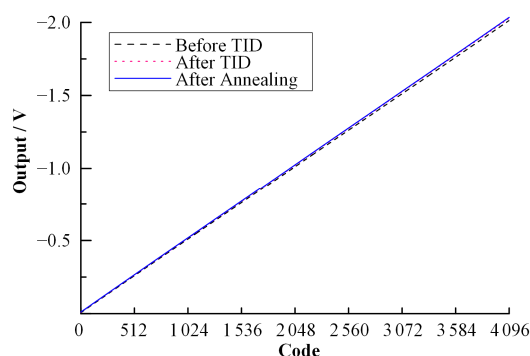


图 14 DAC 输出函数
Fig.14 Transfer function of the DAC.

2.2.3 高辐射剂量试验与系统应用

此外,为进一步验证系统的有效性,分别在单粒子效应评估试验与总剂量效应评估试验中采用高辐射剂量条件,使用设计的系统对芯片进行辐照效应监测。单粒子效应高辐射剂量条件为:粒子源为 $^{209}\text{Bi}^{31+}$,单次试验粒子总数为 $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$,其余试验条件保持不变,系统监测数据如图 15 所示,整个试验过程中芯片负电流抖动幅度为 0.25 mA,正电流抖动幅度为 0.14 mA,未出现单粒子锁定,而单粒子翻转总计数随着粒子打击数而升高,最终结果高达 452 次,且系统软件出现翻转数超出设定卡标值的窗口提示;总剂量效应高辐射剂量条件为:以 $0.5 \text{ Gy}(\text{Si}) \cdot \text{s}^{-1}$ 的剂量率照射至 3 000 Gy(Si),其余试验条件保持不变,系统测量数据表明,在辐照总剂量达 2 000 Gy(Si)后,芯片电参数出现显著恶化,最终辐照前后芯片正负电流分别增大 0.984 mA、1.232 mA, DNL 与 INL 辐照前后变化范围分别在 4 LSB、7 LSB 内,系统软件在测量参数结果与设定的标称值进行比较后,将数据与判定结果直观输出至前端用户界面并进行后台存储。

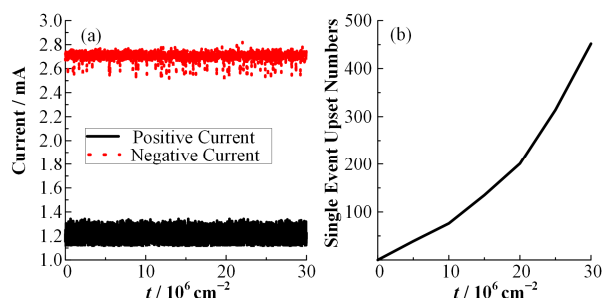


图 15 高剂量辐照条件下电流(a)与单粒子翻转数的变化(b)
Fig.15 Current (a) and single event upset numbers variation (b) on the condition of high dose radiation.

3 结语

本文在通用 PXI 平台上,使用模块化仪器与虚拟仪器技术,开发程序以及设计应用电路夹具,研制出了一套通用 DAC 抗辐射性能评估测量系统。系统采用开尔文四线法和均值采样算法实现了高精度监测芯片电流与电压,利用软件配置矩阵开关实现了参数测量项的全自动切换,使用 PXI 总线同步与触发模式控制达到了模块化仪器间的高速响应,并采用三次样条算法准确抽取出了反应单粒子敏感性的关键参数。使用该系统对自主研发的星载数模转换器进行抗辐射性能评估,实际应用表明,研制的系统能够正确反映出 DAC 的抗辐射性能,为 DAC 等类似功能芯片辐照研究提供了一个良好的试验平台。

参考文献

- 1 Hu X Y, Chen H C, Chen Kai, *et al.* Development of COTS ADC SEE test system for the ATLAS LAr calorimeter upgrade[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(6): 060403. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.060403
- 2 Kunnath A T, Sahoo B. A digitally assisted radiation hardened current steering DAC[C]. 2016 29th International Conference on VLSI Design and 2016 15th International Conference on Embedded Systems (VLSID), Kolkata, India: IEEE Computer Society, 2016: 559–560
- 3 Kruckmeyer K, Prater J, Brown B. Analysis of low dose rate effects on parasitic bipolar structures in CMOS processes for mixed-signal integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(3): 1023–1031
- 4 Stone S, Lombardi R, Seehra S, *et al.* Single event effects characterization of Maxwell 7846B DAC[C]. Miami, Florida: IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2012. DOI: 10.1109/REDW.2012.6353713
- 5 王义元, 陆妩, 任迪远. 不同 ^{60}Co γ 剂量率下 10 位双极 D/A 转换器的总剂量效应[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(10): 951–955
WANG Yiyuan, LU Wu, REN Diyuan. Total dose effect of 10-bit bipolar D/A converter under different ^{60}Co γ dose rates[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(10): 951–955
- 6 王信, 陆妩, 郭旗. 12 位 LC2MOS 工艺数模转换器总剂量电离辐射效应[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(12): 2355–2360
WANG Xin, LU Wu, GUO Qi. Total ionizing dose effect on 12-bit LC2MOS digital-to-analog converter[J]. Atomic

- Energy Science and Technology, 2013, **47**(12): 2355–2360
- 7 王义元, 陆妩, 任迪远. 12 位双极数模转换器高低剂量率的辐射效应[J]. 核技术, 2008, **31**(9): 685–688
WANG Yiyuan, LU Wu, REN Diyuan. Radiation effects of a 12-bit bipolar digital-to-analog converter under different dose rates[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(9): 685–688
- 8 薛玉雄, 杨生胜, 陈罗婧. 空间单粒子锁定效应研究[J]. 核技术, 2012, **35**(9): 692–697
XUE Yuxiong, YANG Shengsheng, CHEN Luojing. Investigation of single event latchup[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(9): 692–697
- 9 任学明, 贺朝会. 空间轨道单粒子翻转率预估的小样本法[J]. 原子能科学技术, 2009, **43**(2): 165–169
REN Xueming, HE Chaohui. Small sample method for predicting single event upset rate in space orbits[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(2): 165–169
- 10 姚志斌, 范如玉, 郭红霞. 静态单粒子翻转截面的获取及分类[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(3): 811–816
YAO Zhibin, FAN Ruyu, GUO Hongxia. Acquisition and classification of static single-event upset cross section for SRAM-based FPGAs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, **23**(3): 811–816
- 11 Huang X, Huang J. ADC/DAC loopback linearity testing by DAC output offsetting and scaling[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2011, **19**(10): 1765–1774
- 12 Darco M, Liccardo A, Vadursi M. Design of a test equipment for DAC's performance assessment[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009: 1232–1237
- 13 Vavilina E, Gaigals G. Improved LabVIEW code generation[C]. 2015 IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, 2015: 1–4
- 14 Wang H, Li K, Li D. LabVIEW's code style and optimization[C]. International Conference on Measurement, Information and Control, 2013: 1483–1486
- 15 Zhang Q, Deng M, Zhang Q, *et al.* Design of data acquisition system based on SoPC and LabVIEW[C]. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, IEEE, 2011: 1036–1039
- 16 QJ10005-2008: 宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2008
QJ10005-2008: Test guidelines of single event effects induced by heavy ions of semiconductor devices for space applications[S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, PRC, 2008