

# 模数转换器辐照效应测试系统研制

姚志斌, 何宝平, 张凤祁, 张科营, 王圆明

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710613)

**摘要:**本工作研制基于柱形图分析法的模数转换器辐照效应测试系统。详细描述了系统的测试原理、系统组成、系统控制流程及系统实现的功能。利用该系统在 $^{60}\text{Co}$ 源上对商用12位AD574AJD芯片进行了总剂量效应试验。结果表明,系统所测的ADC器件的静态参数及功能参数能正确反映器件的效应损伤情况,是一良好的ADC器件辐照效应测试平台。

**关键词:**模数转换器;辐照效应;微分非线性;增益误差;参考电压

中图分类号:TN386.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)04-0368-05

## Development of Measurement System for Radiation Effect on A/D Converter

YAO Zhi-bin, HE Bao-ping, ZHANG Feng-qi, ZHANG Ke-ying, WANG Yuan-ming

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

**Abstract:** A measurement system for radiation effects on analog-to-digital (A/D) converter based on histogram method was developed. Testing principle, system composition, control flow and systemic function were described. Total dose effects experiment of 12 bit AD574AJD using the system was carried out on  $^{60}\text{Co}$  source to verify its effectivity. The results show that the static parameters and functional parameters gained by the system can accurately reflect the damage effect of the devices under test. So the system is a well test bench for radiation effects on A/D converter.

**Key words:** analog-to-digital converter; radiation effects; differential non-linearity; gain error; reference voltage

随着航天事业的发展,模拟数字转换器(ADC)在空间卫星上应用的越来越多,这就要求ADC器件具有较高的抗辐照性能。因此,研究ADC器件的效应测试方法,建立ADC器件的辐照效应测试系统成为空间辐射效应研究的一项重要内容。

国外ADC器件的辐照效应研究始于20世纪90年代中期,目前已对ADC器件辐照效应的测试方法、效应机理、效应规律等进行了全面而深入的研究。国内则起步较晚,在2000年前后,航天五院及中国科学院等单位开展了一些初步研究,分别建立了各自的效

应测试系统。但这些系统仅针对极个别的ADC器件,缺乏通用性,且存在测试参数少、测试精度低等诸多不足。由此,本工作在综合调研国内外ADC器件辐照效应测试方法的基础上,研制1套适用于总剂量环境的,具有通用性强、可测参数多、精度高等特点的ADC器件辐照效应测试系统。

## 1 系统原理及构成

### 1.1 系统测试原理

在稳态辐照环境下,ADC器件的静态参数(如偏置误差、增益误差、非线性微分误差、非线性积分误差、失码)<sup>[1]</sup>、动态参数(如信噪比、总谐波失真比、无杂散动态范围)<sup>[2]</sup>及功能参数(如器件电源功耗、参数电压)均会发生退化。因此,这些参数便成了最好的效应表征量。但ADC器件动态参数的测试对测试

环境、测试系统的要求很高,因此,目前国外大多ADC器件辐照效应测试系统均以测试器件的静态参数及功能参数为主。国内外的一些研究<sup>[3-4]</sup>也表明,静态参数及功能参数比动态参数更敏感,已足以表征ADC器件的辐照损伤程度。

ADC器件静态参数测试最常用、最通用的方法是柱形图(Histogram)测试法<sup>[5]</sup>。柱形图测试法又称为码密度直方图测试法,它是对采样输出代码进行统计分析以获得测试电路性能参数的测试方法。图1a为输入周期信号为锯齿波时的理想码密度直方图。可看出,锯齿波或三角波为输入时,除了边缘上的两个点,其它码元的输出概率相同。在实际电路中,ADC器件的非线性、丢码、增益误差、漂移及噪声等原因均会造成码密度图的变化(图1b)。

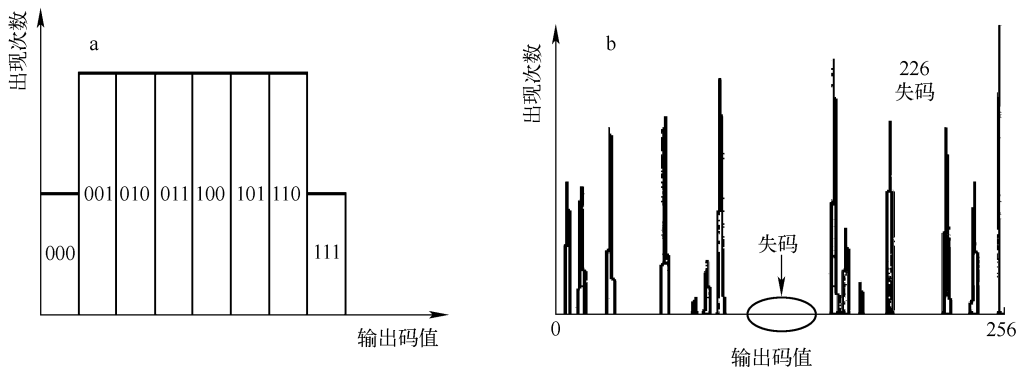


图1 输入为锯齿波时的码密度图

Fig. 1 Histogram of code density with sawtooth wave as analog input

a——理想情况;b——实际情况

对于  $z$  位的理想ADC,1套完全转换码应有  $2^z$  个。在理想情况下,如果任意波形发生器初始化斜波每周期的点数为  $m2^z$  ( $m$  为正整数),那么,每次波形发生器输出一完整的斜波,ADC必然输出  $2^z$  个码值,且每个码的个数为  $m$ 。但实际中的ADC每个码对应的码宽不同,测试过程中获得的转换码的个数也必然不同。通过多次测试,对于转换结果可统计出每个码出现的次数,从而作出码密度图或码分布图(图1b)。而每个码出现的次数与总码个数之比必然等于该码的码宽与输入模拟幅值之比,由此便可得到微分非线性

(DNL)、积分非线性(INL)等静态参数。为保证每个码宽的精确统计, $m$ 及测试扫描次数应足够多。

此外,在进行实际测试时,需考虑到偏置误差和增益误差的影响,设定的ADC器件的输入幅值一般应略大于标称幅值,这样,转换结果中端点的数码方可能多于其它点的点数。因此,需除去第1点和最后1点的影响,码值实际的平均个数  $k$  为:

$$k = \frac{2^z mn - N(0) - N(2^z - 1)}{2^z - 2} \quad (1)$$

其中: $z$ 为被测ADC的位数; $n$ 为扫描次数; $m$

为单次扫描中每个码值的出现次数;  $N(i)$  为第  $i$  个码值的总出现次数。

根据微分及积分非线性误差的定义, 可得:

$$DNL(i) = \frac{\text{实际码的出现次数}}{\text{理想值}} - 1 = \frac{N(i)}{k} - 1 \quad (\text{LSB}) \quad (2)$$

$$INL(i) = \sum_{j=1}^i DNL(j) \quad (\text{LSB}) \quad (3)$$

式中: LSB (least significant bit) 指 ADC 器件输出数字量变化 1 个最低有效位所需的输入模拟电压的变化量, 为积分与微分非线性误差的表

征单位。

## 1.2 测试系统组成

图 2 为以柱形图分析法为基础研制的 ADC 器件的辐照效应在线测试系统的原理框图。系统由上位计算机、测试板、辐照板 3 部分组成。上位计算机与测试板之间用 RS422 串行传输总线进行数据传输, 测试板与辐照板之间则用 50 芯的扁平电缆连接。系统的核心为测试板, 测试板上主要包括下位 CPU、被测器件参考源、波形发生器、逻辑控制电路、功能监测电路等 5 部分。

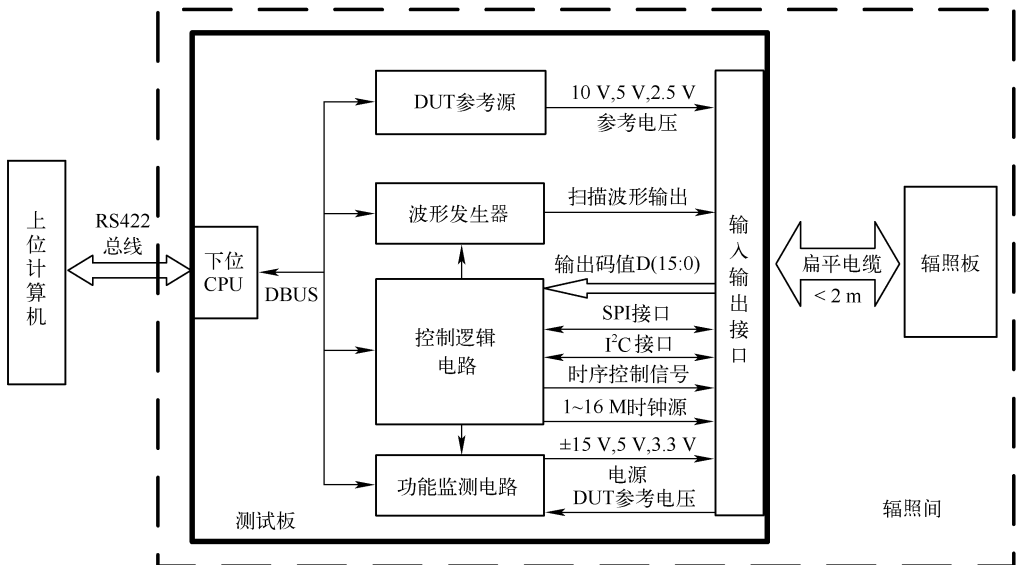


图 2 ADC 辐照效应在线测试系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of measurement system for radiation effects on ADC

下位 CPU 主要负责与上位计算机间的长线通讯, 并将从上位计算机发来的命令转达到逻辑控制电路, 使其按照上位计算机的意图开始工作, 随之将从测试板其它部分获取的采集数据进行简单处理, 回传给上位计算机。

逻辑控制电路负责对波形发生器及功能监测电路的控制, 并按照被测 ADC 的控制时序, 生成时序控制信号。为使系统具有普适性, 逻辑控制电路为被测器件提供了 SPI、I<sup>2</sup>C、Ser、Par 等接口。此外, 逻辑控制器还负责被测 ADC 输出数据与下位 CPU 间的数据交换。

波形发生器在逻辑控制电路的控制下, 以一定的频率及码值顺序, 将离散的信号转换成

模拟信号。此外, 为提高输出波形的信噪比, 波形发生器还包括滤波电路、偏置及增益校正电路等。设计波形发生器时, 重点考虑波形发生器模拟输出的精度问题。

功能监测电路主要是向辐照板及被测器件提供 ±15、5、3.3 V 电源, 并监测这些电源到辐照板上的电流, 当电流大于保护阈值时, 主动切断电源。此外, 还具有被测器件参考电压监测的功能。

DUT 参考源主要针对无内部参考的 ADC 器件设计, 系统可提供 10、5、2.5 V 3 种参考源。在设计时, 选用温漂及噪声尽可能小的电压基准芯片。

### 1.3 系统控制流程

下位 CPU 是 ADC 辐照效应测试系统的核心控制器件。上位机的任何意图均通过下位机对测试板其它部件的控制来实现。因此,系统的控制流程实际上就是下位 CPU 的控制流程。

系统加电后,下位 CPU 进入循环等待状态。当要进行 ADC 器件测试时,上位机先向下位 CPU 发送测试设置命令(如模拟输出电压的范围、精度、循环次数,被测 ADC 器件的位数、控制时序类型等),随后发送开始测试命令,使得下位 CPU 进入 ADC 测试子程序。ADC 测试子程序按照前面的测试设置,在被测器件的模拟输入端以所设置的精度按从小到大的顺序逐点加测试电压,测试板的控制逻辑电路则控制 ADC 器件进行 AD 转换,读取转换码值,并统计各码值的出现次数,若为测试的第 1 个循环,则系统还向上位机回传当前的转换码值用以获取器件的转换特性曲线。当模拟输出电压达到设置范围的上限时,则进入下一测试循环,当循环次数达到所设置值时,则向上位回传各码值的出现次数,随后退出本次测试,返回到循环等待状态,等待上位机的下次测试命令。

### 1.4 系统功能

通过系统的软硬件设计及优化,ADC 辐照效应测试系统实现了如下功能:

- 1) 长线测试 ADC 器件的转换特征曲线及静态参数,诸如精度、偏置误差、增益误差、微分非线性误差、积分非线性误差、失码数等;
- 2) 监测 ADC 器件功能参数,诸如参考电压、功耗电流,并具有电流保护功能;
- 3) 提供 $\pm 15$ 、 $5$ 、 $3.3$  V 多种电源电压,10、

5、 $2.5$  V 多种外部电压基准,从而实现对不同工作电压、不同电压基准的 ADC 的测试;

4) 具备 SPI、 $I^2C$ 、Ser、Par 等接口,可对不同接口类型的 ADC 进行测试;

5) 最小模拟输出精度达  $38.1 \mu\text{V}$ ,最大可测 ADC 位数达 14 位;

6) 实现偏置误差及增益误差的自动校正;

7) 系统上位机控制软件可由用户随意配置测试任务,可实现测试的无人值守和测试任务的保存与调用。

## 2 系统考核与验证

利用该系统对 12 位 ADC 芯片 AD574AJD(0709 批)在 $^{60}\text{Co}$ 源上进行了辐照效应试验。辐照时,AD574 所有数字信号输入端均加高电平,模拟信号输入端加  $10$  V。辐照剂量率(以 Si 计,下同)为  $0.5 \text{ Gy/s}$ ,测试采用原位测试方法。

图 3 为 AD574 在不同剂量点时的微分非线性特性曲线。在  $1 \text{ kGy}$  时,微分曲线已发生明显变化,到  $2.5 \text{ kGy}$  时,已有许多 DNL 绝对值超过  $1 \text{ LSB}$ ,表明器件出现了大量的失码。

在试验中,还测试了器件的增益误差、零点误差、失码数、功耗电流、参考电压等参数。图 4 为其中一些参数在整个辐照过程中及辐照后  $4 \text{ min}$  退火的变化曲线。可看出,辐照到  $2.5 \text{ kGy}$  时,AD574AJD 的增益误差(其数值一般用满量程电压的百分数表示)、失码数、参考电压均发生了较大漂移。但在辐照后  $4 \text{ min}$  内,这些参数便大范围回漂。这一现象与文献[6]中的 AD574 辐照效应数据相互吻合。

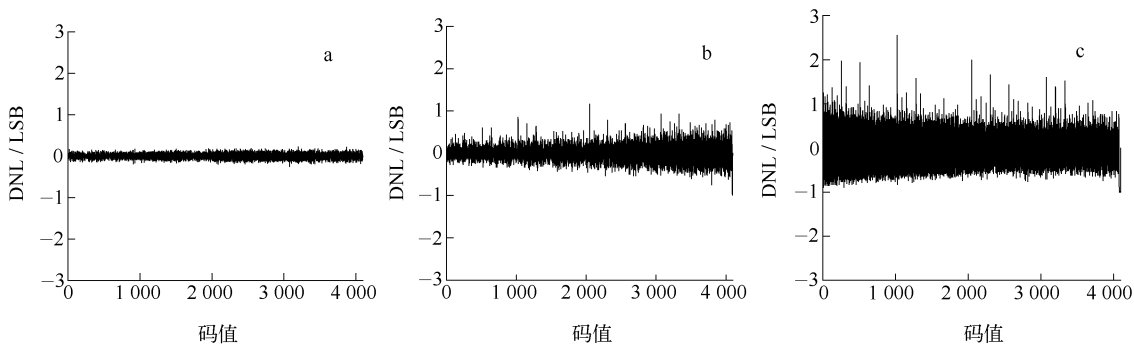


图 3 不同剂量点时的 AD574AJD 微分非线性曲线

Fig. 3 DNL degradation of AD574AJD vs total dose

a—辐照前;b— $1 \text{ kGy}$ ;c— $2.5 \text{ kGy}$

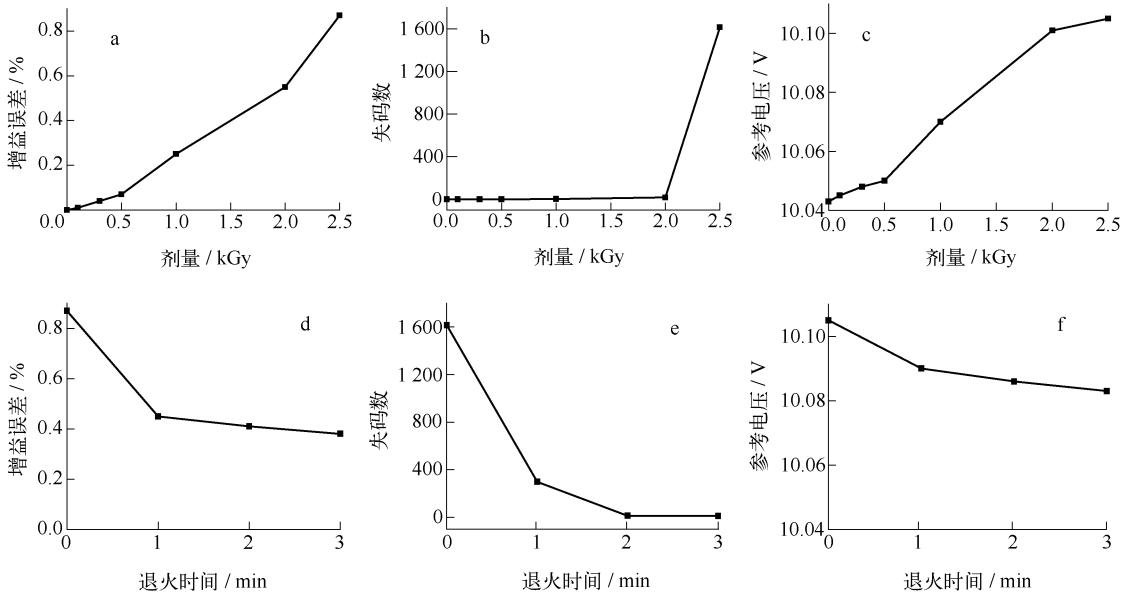


图4 不同剂量(a、b、c)及退火时间(d、e、f)下 AD574AJD 的参数变化

Fig. 4 Some parameters degradation of AD574AJD vs total dose (a,b,c) and anneal time (d,e,f)

a,d——增益误差;b,e——失码数;c,f——参考电压

### 3 结语

系统的考核验证试验表明,所研制的基于柱形图测试法的 ADC 辐照效应测试系统功能强大、性能优良,所测得的参数能准确反映器件的辐照损伤程度。获得的数据与国外文献报道吻合良好。该系统的建立为研究 ADC 器件的辐照效应提供了良好的实验平台。

### 参考文献:

- [1] 童光球,何强,张秀增,等. ADC、DAC 静态特性测量标准[J]. 现代计量测试,1998(2):11-14.  
TONG Guangqiu, HE Qiang, ZHANG Xiuzeng, et al. A testing standard for the static properties of ADC and DAC[J]. Modern Measurement and Test, 1998(2): 11-14(in Chinese).
- [2] 崔庆林,蒋全和. 高速 A/D 转换器动态参数的计算机辅助测试[J]. 微电子学,2004,34(5):505-509.  
CUI Qinglin, JIANG Quanhe. A study on computer aided test of dynamic parameters of high-speed analog-to-digital converters[J]. Microelec-

tronics, 2004, 34(5): 505-509(in Chinese).

- [3] LEE C I, RAX B G, JOHNSTON A H. Hardness assurance and testing techniques for high resolution (12- to 16-bit) analog-to-digital converters[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1995, 42(6): 1 681-1 688.
- [4] 李贵山,赵又新,刘保录,等. 12 位 A/D 转换器总剂量辐射效应的测试技术[J]. 核技术,2000, 23(10): 721-725.  
LI Guishan, ZHAO Youxin, LIU Baolu, et al. Total dose effects testing techniques for 12 bit A/D converters[J]. Nuclear Techniques, 2000, 23(10): 721-725(in Chinese).
- [5] 罗业平. A/D 转换芯片测试方法及应用[J]. 信息与电子工程,2005,3(2): 123-136.  
LUO Yeping. Testing method and application of A/D converters[J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(2):123-136(in Chinese).
- [6] YOUK G U. Dose rate effects of a bipolar A/D converter[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop. Gainesville, USA: Florida University, 1996: 38-43.