DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0501-06

冲击加速度存储测试的变频采样策略分析*

陈昌鑫[1,2],靳 鸿[3,4],马铁华[1,2,4]

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051;
2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051;
3. 苏州大学机电工程学院,江苏 苏州 215021;
4. 中北大学计算机与控制工程学院,山西 太原 030051)

摘要: 冲击加速度测试过程中信号存在低速、中速和高速变化的特点,采用固定采样频率完成整个测试过程的参数测试是不合理的,为了减少数据冗余、保证信号无失真恢复,在改变 ADC 采样频率的变频采样策略基础上,提出一种数字变频采样策略。使用两片存储器,以高速采样频率得到充足数据源并且以同样频率写入存储器 1,根据信号变化特征改变存储器 2 的地址推进频率,对存储器 1 里的数据进行抽点存储,实现变频采样。经过 Hopkinson 杆上的冲击测试,变频测量系统具有抗冲击可靠性。仿真和测试表明,变频采样方法可以有效解决采样频率、数据容量之间的矛盾。

关键词: 爆炸力学;动态测试;变频采样;采样策略;加速度

中图分类号: O384 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

存储测试[1]是在对被测对象无影响或者影响可以忽略的情况下,将电池供电、高强度壳体防护的存储测试仪器置入被测对象或者被测环境中,实况地获取动态参数,事后回收存储测试仪器,通过计算机读数再现测试过程,特别适合高温、高压、高冲击等恶劣环境以及不易引线测试的场合,例如高冲击弹载参数测试[2]、冲击波参数测试[3]。

将弹载冲击加速度存储测试仪器置入弹丸内部进行实况测试时,为减小对弹丸的影响,要求采用电池供电和存储器记录数据的存储测试仪器体积小、功耗低,则电池容量和存储器容量有所限制。弹载加速度存储测试仪器具备存储测仪器的一般特征外,还有一些特征,例如冲击加速度测试过程中信号存在低速、中速和高速变化。弹载加速度参数测试场合,一个测试过程包含 3 个典型子过程[1],即第 1 子过程(弹丸发射)、第 2 子过程(弹丸空中飞行)、第 3 子过程(弹丸撞击目标),其加速度信号按照变化速率可以分为第 1 子过程(中速变化),第 2 子过程(低速变化),第 3 子过程(高速变化),参考文献[1]指出火炮弹丸全弹道加速度信号的 3 个过程持续的时间相差千倍。于是在一个测试过程中,被测信号的频率变化很大,如果采用固定采样频率是不合理的[1],例如采用高速采样频率则在低速和中速变化过程记录大量冗余数据,且在测试全过程采用高频采样会导致测试仪器的功耗较高,采用低速或中速采样频率则导致高速变化过程的信号记录不完整。因此,比较合理的采样策略是变频采样,其核心思想是在能够完整反映被测信号的所有信息的前提下,减少冗余数据的存储[4]。通过分频改变 ADC 采样频率的采样策略能够减少冗余数据,但是在变频的交界点处存在信号连续变化而采样频率阶跃变化导致部分信号数字化不完整的问题[4-7]。

本文中,在分频改变 ADC 采样频率的采样策略基础上,提出一种数字变频采样策略,将采样概念扩展为对模拟量和数字量的抽取,其基本思想是采用固定的 ADC 采样频率,在数字量中抽点存储实现变频采样。

1 采样策略分析

采样策略是解决采样频率、数据容量、测试时间等因素之间的方法[4]。被测动态参量在实验中经历

* **收稿日期**: 2013-12-06; **修回日期**: 2014-04-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51275488);山西省青年科技研究基金项目(2013021015-1)
第一作者: 陈昌鑫(1988—),男,博士研究生; **通讯作者**: 靳 鸿,jinhong@nuc.edu.cn。

k 个子过程，采样频率、存储数据容量、测试时间之间的关系满足：

$$M=\sum_{i=1}^{k} f_i T_i \tag{1}$$

式中：M 是数据容量，f_i 是第 i 个子过程的采样频率，T_i 是第 i 个子过程的采样时间。

如果采用固定的采样频率 f_0 完成整个测试过程的测试，其数据容量 M_1 满足：

$$M_1=\sum_{i=1}^{k} f_0 T_i = k f_0 T_i \tag{2}$$

如果按照子过程的采样频率与测试过程特征相适应的原则，改变测试子过程的采样频率，其数据容量 M_2 满足：

$$M_2=\sum_{i=1}^{k} f_i T_i \tag{3}$$

针对一个测试过程存在若干个子过程，而且若干个子过程信号变化缓慢特征不一致的测试场合，根据采样定理，采样频率至少为模拟信号频率分量最高频率的 2 倍，则为了保证测试数据有效，固定的采样频率 f_i 应按照采样定理设置，于是变频采样策略的采样频率 f_i 与固定采样频率 f_0 满足：

$$f_i \leqslant f_0 \tag{4}$$

各个子过程的采样时间由被测对象的运动规律决定，不能更改 T_i，于是变频采样策略得到的数据容量 M_2 和固定采样频率得到的数据容量 M_1 满足：

$$M_2 \leqslant M_1 \tag{5}$$

因此，根据信号变化缓慢程度的特征，将测试过程分为若干个工作状态，选择与信号变化快慢特征相匹配的采样频率是在保证信号采样不失真前提下减少冗余数据的有效方法。

2 变频采样策略

2.1 改变 ADC 采样时钟的变频采样策略

根据信号变化快慢特征而通过分频改变 ADC 采样时钟是常见的变频采样策略[7]。以高 g 值冲击加速度测试的 3 个子过程测试（弹丸发射中速、弹丸飞行低速、弹丸撞击高速 3 环境测试）为例，存储测试仪器的控制状态图如图 1 所示。

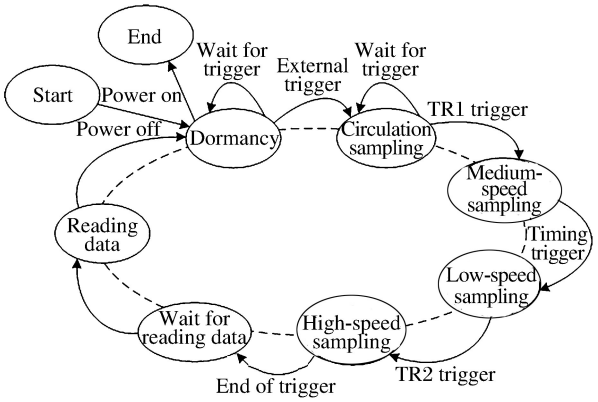

图 1 控制状态图

Fig. 1 Control data diagram

第 1 子过程（中速采样状态）到第 2 子过程（低速采样状态）通过定时触发实现采样频率改变，因为弹丸发射过程时间较短，设置一定时间（一定存储容量）后进行低速采样状态，此时弹丸处于飞行状态。第 2 子过程飞行状态的时间由弹丸运动规律决定，其采样时间较长而且不可精确预见，于是低速采样到高速采样不能采用定时触发，而是采用内触发实现采样频率改变。

低采样频率状态到高采样频率状态切换，会造成触发点之前短暂的一段时间内信号记录不完整问题，因为在触发点前后，信号连续变化，而采样频率阶跃变化，即触发之前信号已经快速变化，而此时仍然以较低的采样频率采样，则出现短暂的信号记录不完整的问题。信号波形示意图如图 2 所示，设置触发界限 a_1。t_1 之前信号变化缓慢，采用低速的 f_2 进行采样、存储（图 2 中 t_1 时刻之前的点表示按照 f_2 采样得到的点）；当信号超过触发界限 a_1（即内触发有效）时，信号快速变化，以高速的 f_3 进行快速采样、存储。在 t_1 时刻之前的瞬间，信号已经快速变化，由于脉冲峰值达不到触发值，ADC 仍然按照低速的 f_2 采样，较低的采样频率无法将这一段信号的

变化完整记录，造成局部信号失真的问题，示意图如图 3 所示，t_1 时刻之前的波形是由图 2 中按照 f_2 采样得到的点连接而成的曲线。

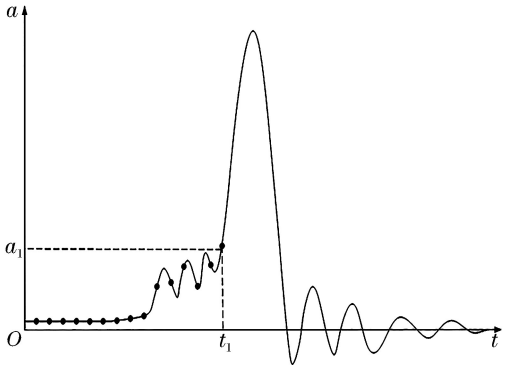

图 2 信号波形示意图

Fig. 2 Signal wave

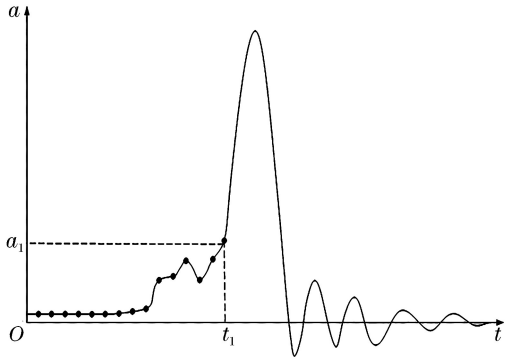

图 3 采样数据恢复波形示意图

Fig. 3 Sampled waveform of data recovery

改变 ADC 时钟的变频采样方法存在一定的局限性，由高速采样过程到低速采样过程不会出现信号失真，而由低速采样过程到高速采样过程，存在有效数据源不足导致信号记录不完整的问题。

2.2　数字变频采样策略

数字变频采样策略是一种不同于改变 ADC 时钟的数字变频采样方法，核心思想是高速采样、选择性存储，即根据信号变化特征确定高速采样频率，以高速采样频率采样得到完整的大量数据源，根据信号变化快慢特征，改变数字量写入存储器的频率实现抽点存储，达到变频采样、减少冗余数据的目的[8]。

在控制模块的管理下，ADC 模块以高速采样频率将模拟信号转换为数字信号写入存储器 1，并且以相同的频率推进存储器 1（例如，FIFO 存储器）的地址，实现数据源的完整记录；分频模块在触发控制模块的控制下，产生与信号变化特征相匹配的频率，改变存储器 2 的地址推进时钟，例如信号处于缓慢变化的时候，存储器 2 的地址推进时钟低于存储器 2 的写入时钟（即：ADC 的采样时钟、存储器 1 的地址推进时钟），即只有地址变化之前的数据写入了存储器 2，这样实现数字量的抽点存储，实现变频采样。数字变频采样策略系统框图如图 4 所示。

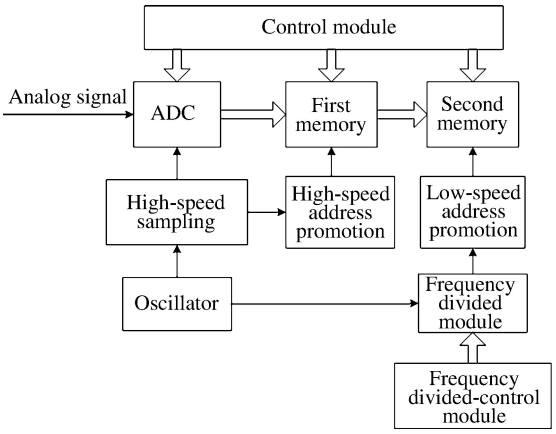

图 4 数字变频采样策略系统框图

Fig. 4 Block diagram of digital frequency-change sampling

由低速采样过程到高速采样过程中，数字变频采样策略的存储器 1 作为数据缓冲器，通过改变存储器 2 的地址推进时钟实现，当 t_1 时刻触发时候，分频模块以高速时钟推进存储器 2 的地址，此时 t_1 时刻之前的一段数据保存在存储器 1（缓冲器）中，保证了 2 个交替子过程之间数据的有效存储，这样保证信号完整、有效。

由高速采样过程到低速采样过程，当触发后以较低的地址推进时钟写入存储器 2 的数据时候，会造成触发时刻之前的高速采样数据丢点，此时启动延迟计数器，延迟改变存储器 2 的地址推进时钟，保证存储 1 中的数据（触发时刻之前的一段高速采样数据）正确、有效的写入存储器 2，这样可保证信号完整、有效。

对数字变频采样策略进行仿真验证，时序图如图 5 所示，图中 CONVST 是 ADC 的采样时钟，设定为恒定的高频时钟（不低于多个子过程最高采样频率）；FRD 是存储器 1（例如 FIFO）的读时钟；FWE

是存储器 1 的写时钟，也即 ADC 的读时钟；ADDR 是存储器 2 的地址推进时钟，由 CONVST 分频得到，MWE 是存储器 2 的写时钟，只有存储器 2 地址变化之前的数据写入存储器 2。

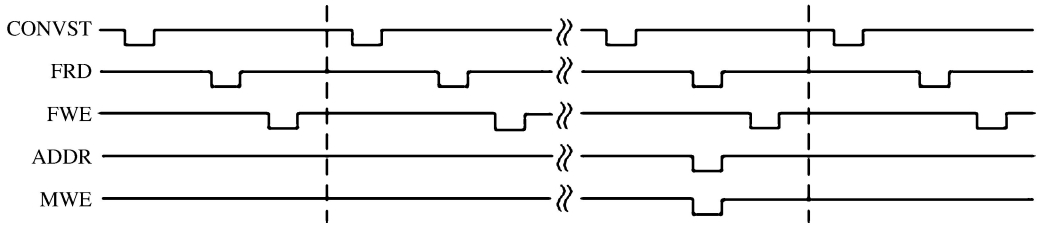

图 5 数字变频采样策略的时序图

Fig. 5 Sequence diagram of digital frequency-change sampling

变频采样策略(数字抽点)仿真图如图 6 所示，将 CONVST 十分频得到 ADDR，sram_wr 是存储 1 的写时钟，sram_rd 是存储器 1 的读时钟，sram_din 是存储器 1 的数据，也即 ADC 输出的数据(10，11，12……50)，sram_dout 是写入存储器 2 的数据(15，25，35，45)，验证了数据抽点方法的正确性。

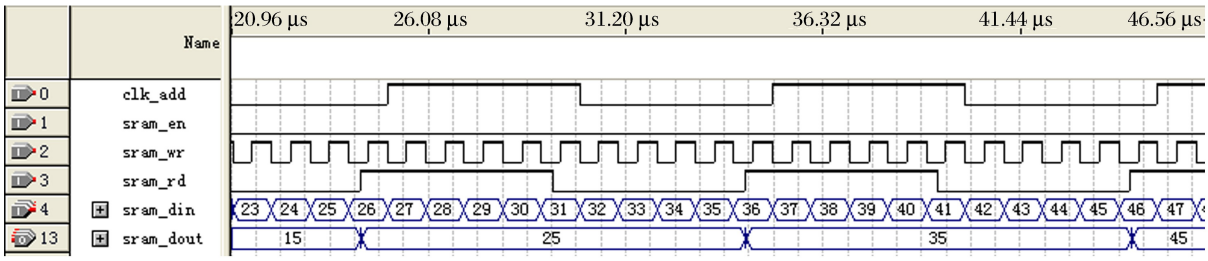

图 6 变频采样策略(数字抽点)仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of digital frequency-change sampling

3 实验验证

冲击加速度测试仪[9]由压电加速度传感器，电荷放大器和放大、滤波电路，数据存储及控制电路等模块组成，测试仪电路安装在金属壳体里面，并经过环氧树脂灌封[10]，其尺寸按照随弹安装要求设计(尺寸参数是∅3.5 cm×5 cm，体积为 48 cm^3)。在实验室的 Hopkinson 杆上进行了抗冲击试验[11]，在 5×10^4 g 的冲击载荷下测试仪可靠工作，可靠性试验的冲击加速度 a 测试曲线如图 7 所示。

在某靶场进行了弹载加速度测试实验，记录了弹丸发射、弹丸飞行、撞击靶板 3 个典型过程的单轴加速度参数，测试曲线如图 8 所示，X 为采样点。

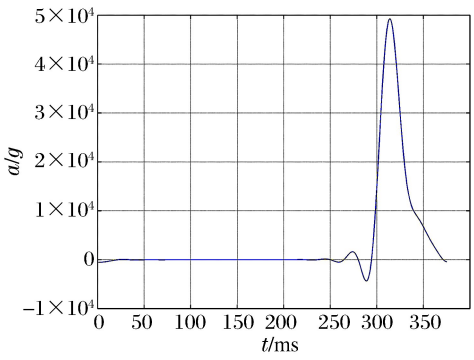

图 7 加速度测试曲线

Fig. 7 Acceleration curve

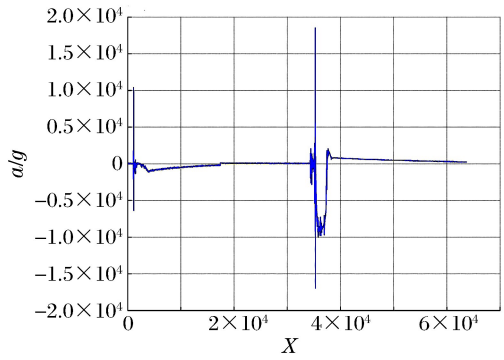

图 8 数字变频采样测试曲线

Fig. 8 Acceleration curve based on digital frequency-change sampling

在触发之前的负延迟部分记录了 2 kByte 的数据；发射过程以 50 kHz 的采样频率记录了 32 kByte 数据；飞行过程以 1 kHz 的采样频率记录了大约 33 kByte 数据；撞击过程以 100 kHz 的采样频率记录了 64 kByte 数据。从触发记录膛内发射过程开始，利用 50、1、100 kHz 记录了 3 个典型过程的数据，其中飞行过程利用 1 kHz 的采样频率记录了 16 905 ms，如果使用最高的 100 kHz 的采样频率记录飞行过程，数据量是 3.22 MByte，则使用变频采样方法在飞行测试过程变频采样减少冗余数据量的比例是 99%。

4　结　语

针对一个存储测试过程根据信号变化快慢特征分为若干个子过程的测试场合，变频采样策略是减少冗余数据的可靠、有效方法。通过方案对比和测试实验，改变 ADC 采样频率的变频采样方法和数字抽点存储的变频采样方法都是有效的变频采样策略，但是数字变频采样方法更优，它通过固定高速采样频率得到完整的数据源，改变存储器地址推进频率实现数据的抽点存储，保证了子过程交替时候信号的完整、有效记录。通过仿真，验证了数字变频采样方法的正确性和可行性；利用数字变频采样方法设计的存储测试仪器在实验室的 Hopkinson 杆上的上进行了抗冲击试验，并且在靶场进行了测试实验，对数字变频采样方法进行了验证，降低了飞行测试过程的采样频率，减少了冗余数据的存储，在爆炸力学动态测试中有一定的应用价值。

参考文献：

[1] 张文栋. 存储测试系统的设计理论及其应用[M]. 北京：高等教育出版社，2002：1-7.

[2] 文丰，任勇峰，王强. 高冲击随弹测试固态记录器的设计与应用[J]. 爆炸与冲击，2009，29(2)：221-224.
Wen Feng, Ren Yong-feng, Wang Qiang. Design of a bomb-borne solid-state recorder for high-shock test and its application[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):221-224.

[3] 丁永红，尤文斌，马铁华. 舰用动爆冲击波记录系统的设计与应用[J]. 爆炸与冲击，2013，33(2)：194-199.
Ding Yong-hong, You Wen-bin, Ma Tie-hua. Design and application of a shock recorder used in warship subjected to dynamic explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):194-199.

[4] 靳鸿，吴志玲，史晓军，等. 基于 SoC 的变频率采样策略设计与实现[J]. 中北大学学报：自然科学版，2012，33(6)：725-729.
Jin Hong, Wu Zhi-ling, Shi Xiao-jun, et al. Variable frequency sampling strategy based on the SoC[J]. Journal of North University of China: Natural Science, 2012,33(6):725-729.

[5] 巩林萍，张凯，祖静，等. 基于 CPLD 的可变频采样存储测试系统的设计[J]. 计量与测试技术，2009，36(11)：38-39.
Gong Lin-ping, Zhang Kai, Zu Jing, et al. Design of self-adaptive sampling memory test system based on CPLD [J]. Metrology & Measurement Technique, 2009,36(11):38-39.

[6] 王鹏，裴东兴，张红艳，等. 存储测试技术中采样策略的研究[J]. 自动化仪表，2012，33(11)：19-22.
Wang Peng, Pei Dong-xing, Zhang Hong-yan, et al. Research on the sampling strategy in storage testing technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2012,33(11):19-22.

[7] 靳鸿，祖静，马铁华. 多采样策略 ASIC 的设计与实现[J]. 测控技术，2012，31(4)：56-59.
Jin Hong, Zu Jing, Ma Tie-hua. Design and Implementation of an ASIC with Multi-Sampling Strategy[J]. Measurement & Control Technology, 2012,31(4):56-59.

[8] 靳鸿，王燕，祖静，等. 变频采样方法：中国，CN102510286A[P]. 2012-06-20.

[9] 李婉蓉，范锦彪，王燕，等. 基于可编程逻辑器件的微型加速度存储测试仪[J]. 山西电子技术，2013(5)：3-4.
Li Wan-rong, Fan Jin-biao, Wang Yan, et al. Micro-acceleration storage tester based on CPLD[J]. Shanxi Electronic Technology, 2013(5):3-4.

[10] 刘建伟，裴东兴，尤文斌，等. 回收式固态弹载记录仪抗高冲击设计[J]. 传感技术学报，2012，25(8)：1045-1048.
Liu Jian-wei, Pei Dong-xing, You wen-bin, et al. Anti-high overload excogitation of missile and hard recovery parameters recorder[J]. Chinese Journal Of Sensors And Actuators, 2012,25(8):1045-1048.

[11] 丁永红,马铁华,祖静,等.基于 MEMS 加速度计的倒置开关[J].爆炸与冲击,2013,33(3):321-324.
Ding Yong-hong, Ma Tie-hua, Zu Jing, et al. Design of an inversion switch based on MEMS acceleration[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(3):321-324.

Analysis of frequency-change sampling strategy for impact acceleration storage measurement

Chen Chang-xin[1,2], Jin Hong[3,4], Ma Tie-hua[1,2,4]

(1. *National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
2. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
3. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou* 215021, *Jiangsu, China*;
4. *School of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*)

Abstract: The fixed sampling frequency is not reasonable for obtaining the signal parameters with variable changing speed during the measurement process of high-*g* acceleration. A digital frequency-change sampling method was put forward in this paper to reduce data redundancy and ensure signal without distortion as well based on the method of changing ADC Sampling-frequency. Two pieces of memory were used to fulfill this target. Sufficient data source got by high-speed sampling frequency was written to the first memory at the same frequency, and the address of the second memory was changed with frequency propulsion according to the characteristic of signal variation, then the data stored in the first memory was extracted thus the frequency-change sampling got realized. Frequency measurement system could bear high impact by Hopkinson bar. Simulation and experiment confirmed that the frequency-change sampling method proposed in the paper can effectively solve the contradiction between the sampling frequency and data capacity.

Key words: mechanics of explosion; dynamic measurement; frequency-change sampling; sampling strategy; acceleration

(责任编辑 王小飞)