

doi: 10.11720/wtyht.2022.1210

周能,邓可晴,庄文英.基于线性放电法的多道脉冲幅度分析器设计[J].物探与化探,2022,46(1):221-228.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1210

Zhou N, Deng K Q. Design of multi-channel pulse amplitude analyzer based on linear discharge[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 221-228. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1210

# 基于线性放电法的多道脉冲幅度分析器设计

周能<sup>1</sup>, 邓可晴<sup>2</sup>, 庄文英<sup>3</sup>

(1.中国科学院 声学研究所 噪声与振动重点实验室,北京 100190; 2.上海合煦信息科技有限公司,北京 100102; 3.北京信息科技大学 信息管理学院,北京 100192)

**摘 要:** 多道伽马能谱仪是天然、人工放射性核素测定的必备设备,多道脉冲幅度分析是多道伽马能谱仪的核心,它决定了对核素的分辨能力和分析精度。本文从线性放电法入手,首先介绍了基于线性放电法的多道脉冲幅度分析器的工作原理,给出了分析脉冲幅度和获取能谱道址的方法;其次围绕分析器的 8 个重要组成部分,详细描述了设计方法,给出了设计依据、设计思路和可实施的方案;最后系统地介绍了多道脉冲幅度分析的工作过程,详细地给出了分析器工作的逻辑时序图,为读者开展此类设计奠定了基础。读者可基于文中给出的工作原理、设计方法和工作逻辑时序图等,再结合现代高科技技术,就可以研制出道宽均匀度好、微分非线性出色、分辨核素能力更强的现代新型多道脉冲分析器,获得能量分辨率更好、测量精度更高的伽马能谱数据,更好地为社会服务。

**关键词:** 线性放电法;脉冲幅度分析器;工作原理;设计方法

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2022)01-0221-08

## 0 引言

多道伽马能谱仪可以测定待测样品或区域的钾、铀、钍等天然放射性核素含量,还可以测定铯(137)、碘(131)等人工核素含量,广泛应用于基础地质研究、矿产能源资源勘查、地质填图、化学元素分析和考古等研究方面<sup>[1]</sup>,还应用于环境监测与评价、核事故应急监测、生物医学和室内装修检测等人命安全方面,还大量应用于国防工业和工农业各部门<sup>[2]</sup>。

对于研究核辐射这样的统计物理现象,多道脉冲幅度分析器是不可缺少的有效设备,因此,开展多道脉冲幅度分析器设计研究,高分辨率地获取各种核素及其含量大小,对核科学和核工程等研究意义重大,它是射线测量必不可少的工具。

最早出现的多道甄别器式多道脉冲幅度分析器,分析器元件数量大,道数不能很多,道宽的均匀性和稳定性很差,现在已经很少采用。近代的多道脉冲幅度分析器绝大多数采用模拟—数字变换原理,这种多道脉冲幅度分析器将输入脉冲按脉冲幅度大小以一定规律(道宽)成比例地变换成数码(即能量道址),并按此能量道码将该输入脉冲的计数存储到存储器中。按照脉冲分析方法,多道脉冲幅度分析基本分为 3 种类型:线性放电法,专用 A/D 法和高速 A/D 法。随着计算机技术和大规模集成电路的迅速发展,出现了基于 FPGA 系统、DSP 系统、嵌入式系统和微控制器等多类别的多道脉冲幅度分析器<sup>[3]</sup>,高集成度、低功耗器件的应用有助于降低多道脉冲分析器的功耗,并有利于其小型化。

专用 A/D 采样法是利用峰值保持电路,将脉冲信号的峰值保持住,利用高精度的 A/D 转换芯片获

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602100)课题“高分辨航空伽玛能谱与高光谱测量应用示范”(2017YFC0602106)

第一作者: 周能(1992-),男,助理工程师,伊理诺依州立大学电子与计算机专业硕士学位,现主要从事地球物理测量方法技术、数理统计应用技术、小型化功率放大器等领域的研究工作。Email:2560202313@qq.com

通讯作者: 邓可晴(1992-),女,项目负责人及研发团队骨干,北京信息科技大学企业管理专业硕士学位,现主要从事数理统计应用技术、互联网+产品技术研发等相关领域的研究工作。Email:965381918@qq.com

得脉冲峰值信息<sup>[4-5]</sup>,以此获得多道伽马能谱数据。这种方式存在的主要问题是:由于 A/D 转换芯片自身存在的非线性,容易使所测谱数据道宽不均匀(微分线性差),必然使能谱数据中带来比较大的系统误差,影响能谱分辨能力和分析结果的精度。为了减少道宽不均匀性,通常需要在电路中增加道宽均匀器,即采用移道的办法使道宽均匀化<sup>[6-7]</sup>。

高速 A/D 脉冲幅度分析法是利用高速 A/D 采集和配套数字信号处理程序搭建的数字脉冲分析器<sup>[8-9]</sup>。高速 A/D 将脉冲信号按相同的频率进行能谱全谱或脉冲全峰采集,然后对采集到的数据进行数字化处理,分析出核脉冲信号的峰值,从而得到能谱数据,减少了复杂的模拟电路;同时数字化处理灵活性强和抗干扰性好,脉冲通过率高。

线性放电法是利用峰值保持电路形成与输入射线脉冲能量成正比的电压信号,利用恒流源对不同幅度的电压信号进行等速度的放电,放电时间与电压信号幅度成正比,通过时钟计数直观地获得射线脉冲信号所在的能量道址,即可获得伽马能谱数据。线性放电法突出优点就是道宽均匀性好,能谱数据积分线性和微分性好,有效减少了系统道宽不均匀带来的微分非线性差等问题。近年来,利用现代的

FPGA 等数字化处理技术<sup>[10]</sup>,完成有效信号判断、逻辑控制、计数、比较和存贮,提高了运行效率和可靠性,实现基于线性放电法的多道脉冲幅度分析,有效克服了过去用该方法造成的系统死时间比较长的缺点。

本文以现代电子技术为基础,通过线性放电法工作原理、脉冲幅度分析器组成和工作流程时序的介绍,充分展示出基于线性放电法的多道脉冲幅度分析器的最新设计理念,为研制出新型多道脉冲幅度分析器提供技术方法。

1 线性放电法工作原理

线性放电法模数变换在 20 世纪 50 年代初首次用于核电子学<sup>[11-12]</sup>。近年来,尽管电子元器件已经发展到集成电路,现成的模数转换器越来越精密,也非常方便使用。但线性放电法国内外许多脉冲幅度分析器至今仍在采用,因其道宽一致性好,微分线性好,一直备受青睐。

图 1 为线性放电法脉冲幅度分析器的工作原理。在  $V_i$  输入端出现脉冲时,输入信号使展宽器中

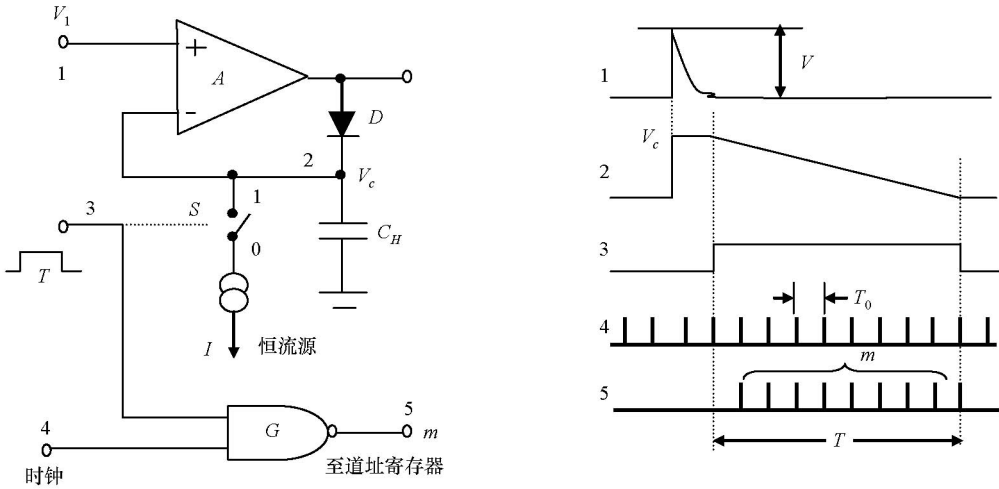


图 1 线性放电法模数转换原理

Fig.1 The principle of analog-to-digital conversion of linear discharge method

的保持电容  $C_H$  充电到等于其幅度  $V$ ;当输入信号下降时,二极管截止, $C_H$  上仍保留  $V$  的电压,形成脉冲峰值保持。在保持一段时间后,控制信号 3 接通  $S$ ,电容  $C_H$  由恒定电流  $I$  放电,线性放电速度为  $I/C_H$ 。在控制信号 3 接通开关  $S$  的同时,控制信号 3 打开计数门,时钟信号 4 通过与计数门  $G$  送至道址寄存器。当  $C_H$  线性放电到零,线性放电(模数转换)结束,控制信号立即关闭开关  $S$ ,同时,关闭计数门

$G$ ,使时钟信号不能通过计数门  $G$  送至道址寄存器。整个放电时间  $T$  为:

$$T = C_H \cdot V / I, \tag{1}$$

式中: $T$  为放电时间,单位 s; $C_H$  为保持电容容量,单位  $\mu F$ ;  $V$  为脉冲峰值幅度,单位 V;  $I$  为恒定电流放电电流,单位 A。

从接通开关  $S$  起到  $C_H$  放电完毕这一段时间





判断为非同时出现的信号,才启动变换,这样就剔除了那些过大或过少等无用信号的分析过程,尤其上大量的噪声,避免由它们引起大量的死时间。当剔除无用信号不启动变换时,接通快慢放电电路把保持电容  $C_H$  上的充电电荷快速泄放干净,时刻准备着接收有用信号。

## 2.2 峰值展宽器与保持

在线性放电法脉冲幅度分析器中,输入信号通过线性门后,需给保持电容  $C_H$  充电到信号的峰值,需要利用展宽器把峰顶的持续时间展宽以便进行幅度—时间变换。

峰值展宽器由图 2 中的运放 A 和电容  $C_H$ 、二级管等组成,在脉冲输入时,电容  $C_H$  被充电到脉冲的峰值电压  $V_c(V)$ ,当脉冲峰值过后电压下降时二极管截止, $C_H$  上的电压基本保持不变,这就实现了展宽的目的。

当输入脉冲宽度比充电时间小,在信号作用期间, $C_H$  电压就充不到峰值  $V_c$ ,这将引起误差;脉冲峰值过后, $C_H$  上的电压也不是保持不变,同样引起误差。因此,选择电容  $C_H$  时,既希望  $C_H$  小些以便充电时间快,又希望  $C_H$  大些以便保持电压下降少,通常电容  $C_H$  的数值取几百至上千 pF。为使输入脉冲峰值与  $V_c$  间有很好的线性关系,需选择正向内阻很小的二极管。

## 2.3 峰值检测器

在脉冲信号峰值过后,即保持电容  $C_H$  上已“保持”了信号的峰值电位后,脉冲信号开始下降时,峰值检测器检测到该下降信号后立即给出充电完毕的触发信号,该触发信号经过后沿整形延时发出启动转换信号 4(如图 2),在信号有效时启动电容  $C_H$  放电开始转换;同时发出系统忙信号给线性门,使线性门关闭(开头倒向 14),阻止随后的输入信号干扰变换过程。

## 2.4 恒流源

在线性放电法的脉冲幅度分析器中,对补展宽后的电容  $C_H$  电压  $V_c$  进行线性放电,需要一个恒定电流  $I$ ,产生这个恒定电流的电路即恒流放电电路或恒流源。

由式(1)可见,放电电流  $I$  的不稳定将引起放电时间  $T$  的变化,这将使同一幅度脉冲进入不同的道址。如果最高道址为 4000 道,允许由于  $I$  的不稳定造成的道址变化小于半道,这就要求放电时间  $T$  的相对变化小于  $0.5/4000$ ,即:

$$\Delta T/T < (0.5/4000) = 1.25 \times 10^{-4},$$

这样就要求放电电流的稳定度  $\Delta I/I < (1.25 \times 10^{-4})$ ,

由此可见,对恒流放电电路的稳定度要求很高。

同时,恒流电路两端电压有较大变化时,流过恒流放电电路的电流应保持不变,否则将使分析器产生比较大的非线性。由式(4)可得,如果要求道宽一致性好于 0.1%,即在不同的输入脉冲幅度时,恒流放电电路的电流变化应好于 0.1%。

## 2.5 线性门

在线性放电法的脉冲幅度分析器中,为了系统正处于分析(忙状态)或正在进行充放电时,不再让输入信号进入分析器而实行占用封锁,不影响正在进行的脉冲幅度分析及相关处理工作,需要通过线性门来控制信号的输入,即相当于一个数控“开关”。目前,通常采用集成模拟开关来实现线性门。

如图 2 所示,当线性门开门时,应保证输入信号线性通过,即输出信号幅度和输入信号幅度成线性关系,传输系数为某一常数。当系统正处于幅度分析(忙状态)、或正在进行充放电时,此时,线性门关门,将信号输入端接地,传输系数为零。

## 2.6 道址计数器

道址计数器由图 2 中的基准时钟、道址计数器、道址寄存器和计数自动加 1 启动逻辑、自动累加计数等组成,它是记录线性放电期间所采集的基准时钟脉冲数,该时钟脉冲数即为输入脉冲信号的道址,随后按照该道址自动启动对道址中的计数进行加 1,获得累加后的计数。

具体工作过程为:当启动保持电容  $C_H$  开始放电的同时启动道址计数器,对输入的基准时钟进行计数。当电容  $C_H$  放电结束的同时停止道址计数器的计数,此时的计数即为输入脉冲的道址,并在控制信号驱使下存入道址寄存器。

计数自动加 1 启动后,先按道址寄存器的道址读出存贮器的原计数,将原计数自动加 1 后,再按原道址写入存贮器中,实现了计数的自动累加。

## 2.7 道宽调节

我们知道,多道脉冲分析器的道宽越小,表示对信号的分类越细,所以道宽小到什么程度是模数变换器的精度标志。

在进行能谱测时,道宽取多大合适,要看使用何种探测器和进行何种物理测量而定。道宽小分得细,但对同样的输入信号幅度范围,变换后的道数就多,成倍地增加了转换时间和数据处理工作量;同时,对于同样的输入信号计数率,道宽小时分到每一道的计数就低,反而增加了统计涨落误差,需要通过延长测量时间来减小误差;另外,道宽小要求模数变换器的稳定性高和道边界干扰小。因此,在实际应

用时,应在谱数据能够正确反映谱的真实形状前提下,尽量使用大道宽。一般情况下,在峰的半高宽内,有 5~10 道就够了<sup>[13]</sup>。

由式(4) $H=I \cdot T_0/C_H$ 可知,改变保持电容的容量  $C_H$  和线性放电的电流  $I$ ,或改变基准时钟周期  $T_0$ ,都是可以改变道宽  $H$ 。改变模拟电路参数的容量  $C_H$  和电流  $I$ ,实际上都是改变线性放电的斜率来调节道宽。为了保证峰值保持稳定可靠地工作,通常情况下只采用改变放电电流  $I$  的方式来调节道宽,并要求不同道宽之间放电电流  $I$  要保持精确的整数倍数。改变基准时钟  $T_0$  能够容易地实现道宽的调整,一般采用同一时钟分频方式来改变  $T_0$ ,并能获得道宽间的精确比例,道宽的改变对模数变换器的零点没有影响。

2.8 转换偏置调节

实际测量时,线性放电不是完全放到电  $V_c=0\text{ V}$ ,而是只对幅度大于某一数值  $V_{os}(\text{offset})$  的谱感兴趣,可以将模数变换器的零点从  $0\text{ V}$  调到  $V_{os}$ ,这时所测谱的第 0 道对应于幅度等于  $V_{os}$  处,称之为转换偏置调节。采用偏置的方式可以使分析器的有限道数用于分析幅度大于  $V_{os}$  的某一段谱数据,缩短了分析时间,节省了存贮空间。

偏置调节主要由甄别 ADC offset 及控制电路组成(如图 2)。甄别 ADC offset 为一电压比较电路,当线性放电的电压下降到预设的偏置电压  $V_{os}$  时,比较电路输出发生翻转,发出停止模数转换命令,模数转换结束。当分析器处于快慢放电时,同样也停止模数转化等工作。

偏置设置有 2 种方式:一种是利用高稳定的基准电源,通过分压调节来提供偏置电压  $V_{os}$ ;另一种是数字设置,按照所设起始道址通过 DAC(数模)来设置偏置电压  $V_{os}$ ,此种方式可以适时地进行偏置调节,设置准确,使用方便。

3 线性放电法脉冲幅度分析器工作过程

脉冲幅度分析器工作简化逻辑时序图如图 3,位于上下甄别阈之间且有效的输入脉冲信号(曲线 1)通过线性门进入展宽器 A,给峰值保持电容  $C_H$  充电。在脉冲信号峰值到达时,保持电容  $C_H$  上已“保持”了脉冲信号的峰值电位  $V_c$ (曲线 3)。

当脉冲信号峰值过后出现电压下降时,展宽器输出信号(曲线 2),峰值检测器检测到该信号,发出充电完毕的标志信号(曲线 4),其正跳变沿触发启动变换信号。启动变换信号(曲线 5)的后沿启动恒

流放电的同时开始时钟(曲线 7)计数,并在此时给出关门信号(曲线 12),使线性门关闭(开头倒向 14),阻止随后的输入信号干扰变换过程。

一旦电容  $C_H$  电压( $V_c$ )线性放电完毕(此时  $V_c=V_{os}$ )(如曲线 3),充放标志(曲线 4)给出停止转换信号,此时道址脉冲停止计数,其计数值即为该次输入脉冲信号的道址(曲线 8)。随后在存贮命令控制信号(曲线 9)驱使下存入道址寄存器,并迅速启动计数自动加 1 命令(曲线 10),先按道址读出存贮器的原计数,将原计数自动加 1 后,再按原道址写入存贮器中,实现了计数的自动累加,此时关闭计数自动加 1 命令(曲线 10),并发出结束取址命令(曲线 11)。以上工作结束后,系统给出不忙状态,并接通线性门,关闭存贮命令,等待下一个有效脉冲的到来。

所以,在一般情况下,控制器要满足下述 3 个条件后才给出启动变换信号 5:

- 1) 信号峰值已经通过。保证保持电容已充电到信号峰值。
- 2) 信号幅度在有用范围内(上、下阈间)。避免无用信号占用变换时间。
- 3) 信号有效。

在满足上述条件后,控制器随后给出启动变换信号 5,使“放电标志”触发器置 1,产生允许线性放电信号 6,使恒流源开关接通,保持电容  $C_H$  线性放电,同时置系统为忙状态。

4 影响脉冲幅度分析器技术指标主要因素

4.1 影响模数转换稳定性的主要因素

影响模数转换稳定性的主要因素是保持电容  $C_H$  的容量、恒流源电流  $I$  和时钟周期  $T_0$ 。这就要求高稳定电容器、高稳定恒流源和石英时钟电路。另外,即使线性门和展宽器的传输系数接近 1,由于存在传输系数的不稳定性,也会使变换系数不稳定。

4.2 引起积分非线性的主要因素

多道分析器的道址  $m$  和道位置  $A$  的关系曲线  $m=f(A)$  叫模数变换特性或幅度响应。理想的脉冲幅度响应为过原点的一条直线  $m=pA$ 。但实际上,脉冲幅度响应并不是过原点的一条直线,而是如图 4 所示的一组实测点组成的曲线  $m_c=f(A)$ ,与幅度响应为线性的  $m=pA+m_0$  之间存在着偏差,即实测脉冲幅度积分的非线性,表示实测幅度响应与理想幅度响应的偏差程度<sup>[14]</sup>。实测幅度的积分线性度越好,意味着在观测的能量范围内,脉冲幅度响应的

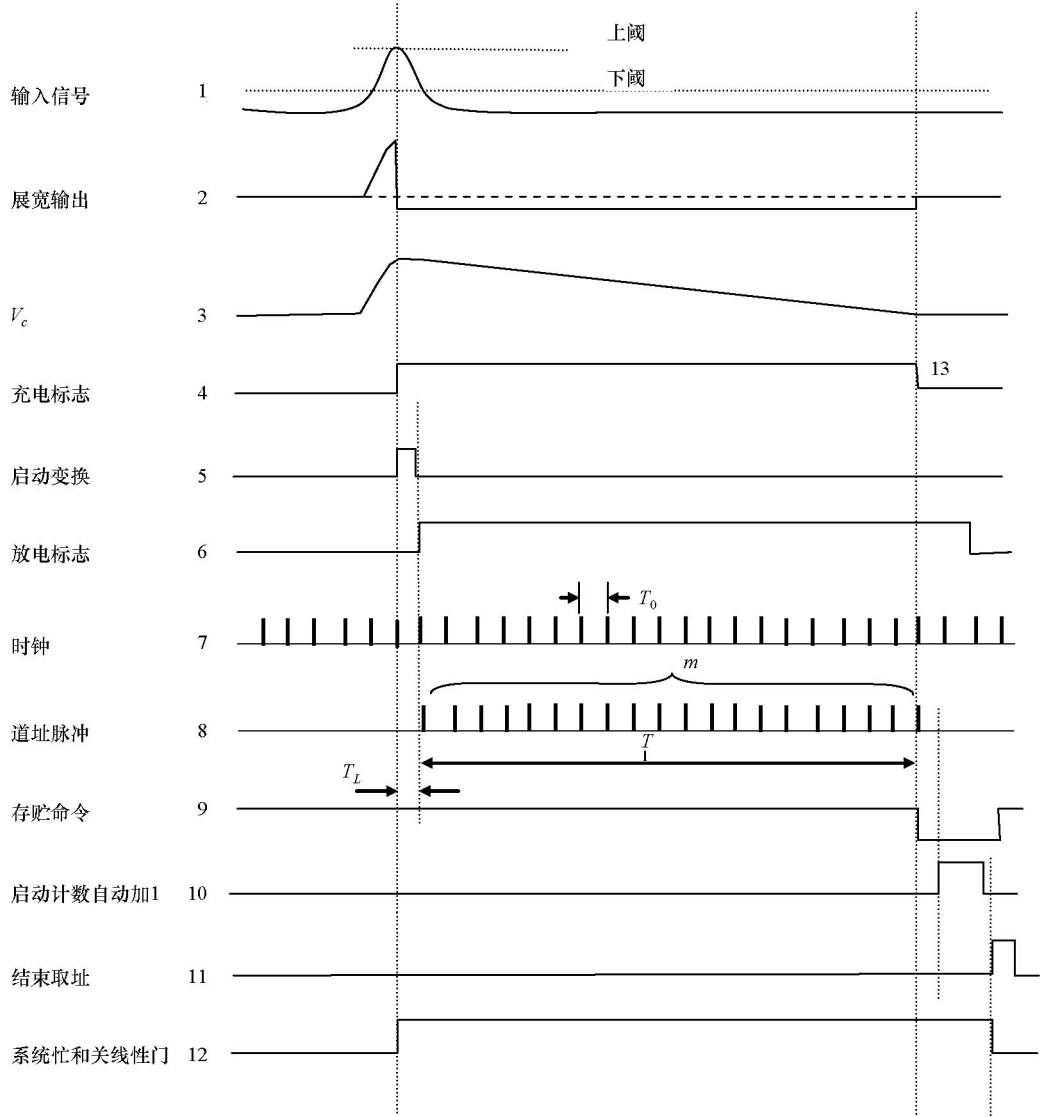


图 3 脉冲幅度分析器工作简化逻辑时序

Fig.3 Simplified logic timing diagram of pulse amplitude analyzer work

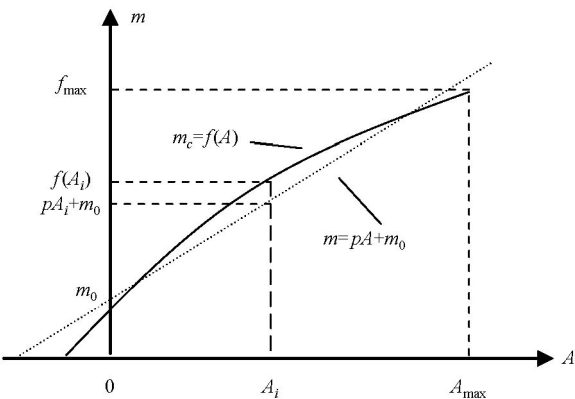


图 4 实测幅度响应与最佳幅度响应

Fig.4 Measured amplitude response and best amplitude response

线性度越好,脉冲幅度的分析也就越准确。

模数变换的积分线性主要决定于线性门、展宽器和进行阻抗隔离缓冲器的积分线性,也和恒流源的恒流程度有关。但是,模数变换器的积分线性只取决于它的模拟变换器,和数字电路无关。

4.3 引起微分非线性的主要因素

模数变换的微分非线性是指各道道宽偏离平均值的程度。其偏离的因素有如下几点:模拟电路的非线性引起的道宽不一致性;数字电路干扰引起的道宽不一致性;随机干扰引起的道宽不一致性<sup>[15]</sup>。

4.4 变换速度的限制

线性放电法模数变换器的变换速度主要取决于线性放电时间  $T$ 。因为:

$$T = mT_0,$$

道址  $m$  越大,所需的放电时间  $T$  越长。特别是道址很多时,这种影响更加明显。



## 5 总结

多道伽马能谱仪是天然、人工放射性核素测定的必备设备,多道脉冲幅度分析是多道伽马能谱仪的核心,它决定了对核素的分辨能力和分析精度。本文从线性放电法入手,介绍了基于线性放电法的多道脉冲幅度分析器的工作原理,给出了各组成单元电路的设计思路和方法,并系统地介绍了多道脉冲幅度分析的工作过程。主要内容为:

1) 介绍了基于线性放电法脉冲幅度分析器的工作原理。给出了线性放电法获取脉冲幅度和能谱道址的方法,以及能谱道宽计算方法和影响因素,指出该方法的优越性。

2) 详细描述了脉冲幅度分析器的设计思路和设计方法。分别介绍了信号有效性检测和判断、峰值展宽器与保持、峰值检测器、恒流源、线性门、道址计数器、道宽调节以及转换偏置调节等分析器 8 个重要组成部分的设计方法,给出了设计依据、设计思路和可实施的方案。

3) 系统地介绍了脉冲幅度分析器的工作过程。从脉冲信号输入开始直至脉冲自动计数的完成,全流程地向读者介绍了分析器的工作过程,详细地给出了分析器工作的逻辑时序图,为读者开展该分析器的设计奠定基础。

4) 比较概要地介绍影响脉冲幅度分析器技术指标的主要因素。分别从影响模数转换稳定性、引起积分非线性、引起微分非线性和变换速度限制等 4 个方面介绍了影响脉冲幅度分析器的主要因素,为读者下一步设计提供参考。

总之,读者可基于文中给出的线性放电法设计脉冲幅度分析器的工作原理、设计方法和工作逻辑时序图等,再结合现代高科技技术,就可以研制出道宽均匀度好、微分非线性出色、分辨核素能力更强的现代新型多道脉冲分析器,获得能量分辨率更好、测量精度更高的伽马能谱数据,更好地为核科学、核工程、地质、石油、化学分析、材料科学、环境科学和生物医学等服务。

## 参考文献 (References):

[1] 周锡华,乔广志.新一代航空多道伽马能谱仪的引进和初步应用[J].物探与化探,2002,26(4):318-320.  
Zhou X H, Qiao G Z. The introduction and application of the new generation airborne multi-channel gamma spectrometer [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(4): 318-320.

[2] International Atomic Energy Agency. Guidelines for radioelement

mapping using gamma ray spectrometry data [R]. IAEA-TEC-DOC-1363, 2003.

[3] 徐静.基于嵌入式 Linux 的便携式多道  $\gamma$  能谱仪的设计与实现 [D].北京:中国地质大学(北京),2009.  
Xu J. The design and implementation of portable multi-channel gamma spectrometer [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2009.

[4] 米耀辉,周锡华,姜作喜,等.基于交叉采样技术的多道脉冲幅度分析仪设计[J].核电子学与探测技术,2014,34(12):1469-1473.  
Mi Y H, Zhou X H, Jiang Z X, et al. Design of multi-channel pulse amplitude analyzer based on interleaved sampling technology [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(12): 1469-1473.

[5] 赖万昌,葛良全,吴永鹏,等.新型便携式微机多道  $\gamma$  能谱仪的研制[J].核电子学与探测技术,2004,9(1):37-40.  
Lai W C, Ge L Q, Wu Y P, et al. A new portable multi-channel  $\gamma$  spectrometry based on inserted PC104 computer [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 9(1):37-40.

[6] 姜赞成,方方,丁卫撑,等.低功耗手持式一体化多道  $\gamma$  能谱仪的设计[J].核电子学与探测技术,2008(11):1223-1225.  
Jiang Z C, Fang F, Ding W C, et al. A design of hand-held gamma spectrometer with low power consumption [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008(11):1223-1225.

[7] 侯胜利,攀卫花.室内多道  $\gamma$  射线能谱仪(NaI(Tl))谱线分析[J].同位素,2005(5):63-66.  
Hou S L, Pan W H. Spectrum analysis with indoor multi-channels gamma-rays spectrometer (NaI(Tl)) [J]. Journal of Isotopes, 2005(5):63-66.

[8] 王蓬,周锡华,姜作喜,等.基于数字脉冲分析器的伽马能谱仪设计[J].物探与化探,2013,37(2):291-294.  
Wang P, Zhou X H, Jiang Z X, et al. The design of gamma-ray spectrometer based on digital pulse amplitude analyzer [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 291-294.

[9] 曾国强,葛良全,熊盛青,等.数字技术在航空伽马能谱仪中的应用[J].物探与化探,2010,34(2):209-213.  
Zeng G Q, Ge L Q, Xiong S Q, et al. The application of digital spectroscopic technique to airborne gamma-ray investigation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 209-213.

[10] 王彦,贺康政,黄松.基于 FPGA 的多道脉冲幅度分析器的设计[J].核电子学与探测技术,2005,35(4):416-419.  
Wang Y, He K Z, Huang S, et al. Design of multichannel pulse amplitude analyzer based on FPGA [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 35(4): 416-419.

[11] 屈建石,王晶宇.多道脉冲分析系统原理[M].北京:原子能出版社,1987.  
Qu J S, Huang J Y. Principle of multi-channel pulse analysis system [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987.

[12] 王经瑾,范天民,钱永庚,等.核电子学[M].北京:原子能出版社,1985.  
Wang J J, Fan T M, Qian Y G, et al. Nuclear electronics [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1985.

[ 13 ] 吴永鹏,赖万昌,葛良全,等.多道伽马能谱仪中的特征峰稳谱技术[J].物探与化探,2003,27(2):131-134.  
Wu Y P, Lai W C, Ge L Q, et al. A new spectrum stabilization technique in portable  $\gamma$ -ray spectrometry [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(2):131-134.

[ 14 ] 庞巨丰.  $\gamma$  能谱数据分析 [M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1990.  
Pang J F.  $\gamma$  energy spectrum data analysis [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1990.

[ 15 ] 何为民,奚大顺.智能放射性勘查仪器[M].北京:原子能出版社,1994.  
He W M, Xi D S. Intelligent radio-logical survey instrument [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994.

Design of multi-channel pulse amplitude analyzer based on linear discharge

ZHOU Neng<sup>1</sup>, DENG Ke-Qing<sup>2</sup>, ZHUANG Wen-Ying<sup>3</sup>

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Shanghai Hexu Information Technology Company, Beijing 100102, China; 3. School of Information Management, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Multi-channel gamma-ray spectrometers are necessary for measuring natural and artificial radionuclides. The core of the multi-channel gamma-ray spectrometers is the multi-channel pulse amplitude analysis, which determines the resolution and analysis accuracy of radionuclides. This study introduces the working principle of a multi-channel pulse amplitude analyzer based on linear discharge and describes the methods for analyzing pulse amplitude and obtaining spectrum peaks. Secondly, this study details the design methods of eight important parts of the multi-channel pulse amplitude analyzer, including the design basis, design idea, and feasible schemes. Finally, this study details the logical sequence diagram of the analyzer, laying a foundation for readers to design a multi-channel pulse amplitude analyzer. Using the working principle, design method, and working logic sequence diagram presented in this paper, as well as modern high technology, readers can develop a new type of modern multi-channel pulse analyzer with uniform channel width, excellent differential nonlinearity, and improved resolution of radionuclides, thus better serving the society using gamma-ray spectrum data with higher energy resolution and high measurement accuracy.

**Key words:** linear discharge; pulse amplitude analyzer; working principle; design method

( 本文编辑:王萌)