

基于球谱仪的中子剂量率仪设计

陈 炼 梁福田 王宝琛 金 革

(核探测与核电子学国家重点实验室 中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 研制了一套基于球谱仪的中子剂量率仪。采用单个慢化球及位置灵敏计数器的探测结构,通过单次测量即可计算出中子剂量等信息。在基于电荷分配法的读出电路中,通过对电荷灵敏放大器及滤波成型电路的参数进行优化,使探测器系统的平均位置分辨达到 6 mm。利用硬件寻峰等数字信号处理技术,使数据获取系统的最高计数率达到 $200\text{ k}\cdot\text{s}^{-1}$,满足剂量率仪实时性的要求。

关键词 中子剂量率仪,位置灵敏计数器,电荷分配法,数字脉冲处理

中图分类号 TL82

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010402

20 世纪 60 年代, Bramblett 等^[1]提出了利用多球系统测量中子能谱的方法。多球谱仪由一系列中心放置热中子探测器的不同直径慢化球组成,慢化球的最小直径增量为 12.7 mm。根据测量计数和能谱响应函数,就可以通过解谱算法求解出中子能谱。由于中子能量响应峰值与慢化球直径之间并没有线性对应关系^[2],因此在不同辐射场中使用时,需要的慢化球数量及大小也不尽相同,这使得多球谱仪使用起来十分不便。

Toyokawa^[3]发展了基于位置灵敏计数器的单球中子谱仪。该谱仪通过位置灵敏探测器将一个慢化球分成不同的计数区,仅需一次测量就可以获得与 BSS 谱仪近似的能谱结果,大大简化了谱仪的使用复杂度。由于基于球型能谱仪的中子剂量率仪具有近似各向同性的能量响应及较宽的能量测量范围,其给出的剂量当量值也更为可信,因而在中子辐射防护领域得到了广泛应用^[4]。

在能谱型中子剂量率仪中,通过测量慢化球不同位置处的中子注量,求解出辐射场的中子能谱,再利用注量剂量转换系数就可以计算出中子周围剂量当量,计算结果的准确度依赖于能量区间的划分和几何模型的精确描述。为此我们设计了基于单球中子谱仪的能谱型中子剂量率仪系统,利用高位置分辨实现对慢化球的准确区域划分,以使中子剂量的测量更为准确。

1 基于球谱仪的中子剂量率仪结构

基于球谱仪的中子剂量率仪结构如图 1 所示。

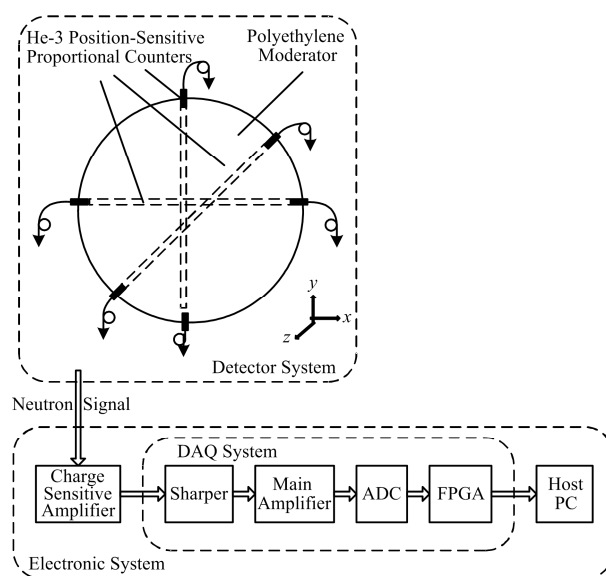


图 1 中子剂量率仪结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the spectrometric neutron dosimeter.

中子剂量率仪由探测器系统和电子学系统两部分构成。其中探测器系统采用直径 30 cm 的聚乙烯球作为慢化体,并按互相垂直的方式将三根位置灵敏计数器安装在慢化球内,计数器相互间的轴心间距为 7 mm。计数器的有效长度为 250 mm,外径为 12.7 mm,管壁材料为 304 不锈钢。计数气体为 He-3,气压为 $8 \times 10^5\text{ Pa}$ 。电子学系统包括电荷灵敏放大器及数据获取系统等。

国家自然科学基金项目(No.11375179)资助

第一作者: 陈炼, 男, 1980 年出生, 2012 年于中国科学技术大学获博士学位

通讯作者: 金革, E-mail: goldjin@ustc.edu.cn

收稿日期: 2014-09-04, 修回日期: 2014-10-30

2 电荷分配法原理

电荷分配法原理如图 2 所示。其中 C_b 为探测器的隔直电容, C_f 、 R_f 为反馈电容与反馈电阻。

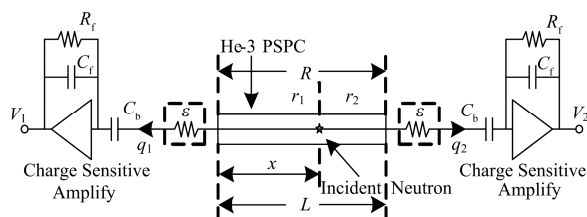
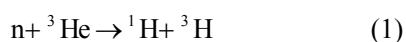


图 2 电荷分配法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of charge division mechanism.

当中子入射到探测器后, 与管内气体发生核反应:



反应产生的带电粒子经电离、倍增后被两端的阳极丝收集。根据电荷分配原理, 两端收集的电荷与入射点到两端的电阻成反比。这些电荷经电荷灵敏放大器放大后, 输出一定幅度的电压信号, 则中子入射位置与两端输出电压信号关系可表示为:

$$\frac{x}{L} = \frac{r_1}{R} = \frac{r_1}{r_1 + r_2} \propto \frac{q_2}{q_1 + q_2} \propto \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

式中, L 为探测器的有效长度; x 为中子入射点位置; R 为探测器阳极丝的总电阻; r_1 、 r_2 为入射点到阳极丝两端的电阻; q_1 、 q_2 为阳极丝两端收集到的电荷; V_1 、 V_2 为前端电路输出电压信号的幅度。考虑在非理想情况下, 电荷灵敏放大器的输入阻抗、隔直电容的等效阻抗以及连接线缆等都会对电荷分配造成影响, 假设这些因素带来的额外阻抗为 ε , 则此时两端输出电压的关系为:

$$\frac{V_2}{V_1 + V_2} \propto \frac{r_1 + \varepsilon}{R + 2\varepsilon} = \frac{R}{R + 2\varepsilon} \cdot \frac{x}{L} + \frac{\varepsilon}{R + 2\varepsilon} \quad (3)$$

即两端输出电压与中子入射位置仍具有线性关系, 但会受到 ε 的影响。 ε 越大, 两者线性关系的斜率就越小, 即位置分辨的动态范围就越小; 而 R 越大, ε 所带来的影响就越小。为获得较好的位置分辨, 在选择探测器时, 阳极丝应具有较高的电阻率; 而当探测器选定时, 则应优化前端电子学尤其是电荷灵敏放大器的设计。

3 电子学系统设计

3.1 电荷灵敏放大器设计

电荷灵敏放大器原理如图 3 所示, 其中 C_d 、 C_s 、 C_{in} 分别为探测器的结电容、分布电容和放大器的输入电容, A_0 为放大器的开环增益。

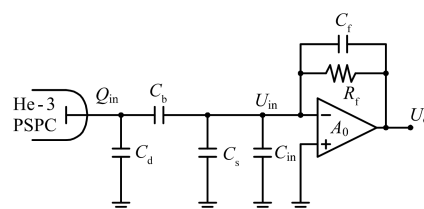


图 3 电荷灵敏放大器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of charge-sensitive amplifier.

当探测器输出电荷 Q_{in} 时, 在放大器输入端形成的电压信号 U_{in} 可表示为:

$$U_{in} = -\frac{Q_{in}}{C_d + C_b + C_s + C_{in} + (1 + A_0)C_f} \quad (4)$$

当 $(1 + A_0)C_f \gg C_d + C_b + C_s + C_{in}$ 满足时, 放大器输出信号幅度为:

$$U_o = -A_0 \cdot U_{in} \approx \frac{Q_{in}}{C_f} \quad (5)$$

其反馈系数为:

$$F = \frac{C_f}{C_d + C_b + C_s + C_{in} + C_f} \quad (6)$$

在电荷灵敏前放中, 隔直电容 C_b 会带入电荷平衡效应, 从而影响探测器位置分辨的动态范围, C_b 越小影响越明显^[5]; C_b 选择过大, 则会使反馈系数变小。反馈电容 C_f 决定了电荷放大的灵敏度, 其容值越稳定, 则输出信号的幅度也能保持恒定, 同时小容值的 C_f 能获得更大的输出信号幅度; 但 C_f 选择过小, 则反馈系数就越小, 电路的稳定性就会变差。反馈电容 C_f 通过反馈电阻 R_f 进行放电, 同时放电的时间常数也决定了系统的最大计数率。为减小弹道亏损的影响, R_f 应选择较大的电阻, 但 R_f 越大, 放电时间常数就越大, 会导致系统的最大计数率变低。放大器的开环增益决定了电路的工作状态, 运放的输入阻抗越大、增益带宽积越宽, 电路的稳定性就越好。

综合考虑信噪比、反馈深度、最大计数率等因素, 我们选择了 100 pF 的隔直电容、1 pF 的反馈电容、10 M Ω 的反馈电阻以及带宽为 1.6 GHz 的 OPA657 实现电荷灵敏放大器设计。

3.2 滤波成形电路设计

从电荷灵敏放大器输出的信号通常混杂着较多的噪声, 因此需要通过滤波成形电路来提高信噪比。根据最佳滤波原理, 可以先用白化滤波器将噪声变为白噪声, 再利用匹配滤波器获得最佳信噪比。由于在实际电路中白化滤波器后的匹配滤波基本是无法实现的, 因此滤波成型电路采用设计如图 4 所示, 使用 CR 高通滤波器来实现白化, 并使用有源滤波

器实现多级 RC 积分电路来近似匹配滤波器。该电路时间常数选择为 $1\ \mu\text{s}$ ，在获得较好的信噪比的同时，输出波形也接近于高斯波形，方便幅度分析使用。

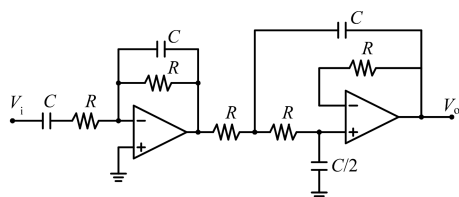


图4 滤波成型电路结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of filter and shaping circuit.

3.3 数据获取系统设计

为了及时了解中子周围剂量当量的变化，需要中子剂量率仪能实时给出中子能谱、总注量及总剂量等相应信息。而基于传统多道模式的采集系统由于死时间较长，使系统计数率受到限制，为此我们设计了基于FPGA (Field Programmable Gate Array) 的高计数率数据获取系统，以满足剂量率仪数据处

理实时性的要求。

数据获取系统的结构如图5所示。由滤波成形电路输出的信号，经主放大后由模拟数字转换器 (Analog-to-digital converter, ADC) 进行数字化，数字化后的数据直接送入 FPGA。当中子击中位置灵敏探测器时，会在探测器两端同时产生信号，因此通过时间符合逻辑就可以将偶然触发的单端信号剔除。在完成事例选择后，利用快速硬件寻峰算法找出对应的两个信号峰值，并计算出粒子入射位置。然后根据事先确定的区域划分方法，对不同区域的粒子入射数做统计。统计完成的数据由 USB 总线传输至上位机，利用解谱算法求解出中子能谱，进而给出中子剂量等信息。利用 FPGA 内部的硬件资源，使信号处理过程与信号采集同步完成，数据获取系统并不产生额外的死时间，从而保证了剂量率仪实时性的要求。同时系统还通过 FPGA 控制高压模块，为探测器提供工作电压。

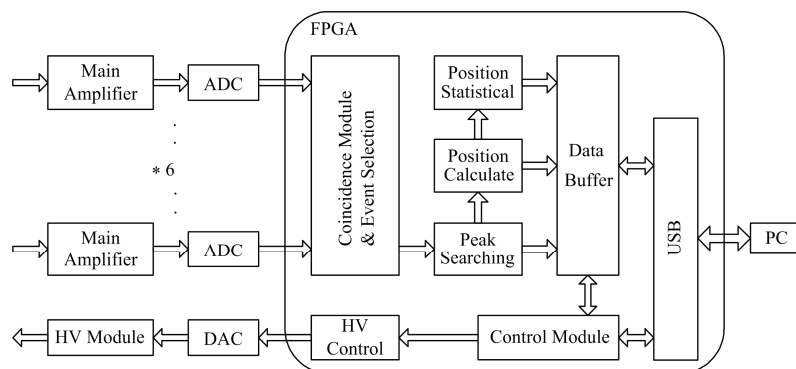


图5 数据获取系统结构示意图

Fig.5 Block diagram of data acquisition system.

4 电子学性能测试

4.1 计数率测试

使用 Agilent 33250A 型信号发生器进行计数率测试。测试结果表明，在成型滤波电路的时间常数选择为 $1\ \mu\text{s}$ 时，数据获取系统可以达到 $200\ \text{k}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最高计数率。由于电荷灵敏放大器的放电时间常数为 $10\ \mu\text{s}$ ，探测器的最大计数率小于 $100\ \text{k}\cdot\text{s}^{-1}$ ，因此系统完全能满足数据实时获取的需求。

4.2 一致性和信噪比测试

我们使用信号发生器对电子学系统的一致性和信噪比进行了测试。由信号发生器输出固定幅度的方波经电容微分后转换为稳定幅值的电流脉冲作为测试信号，同时输入两个前置放大器后，由数据获取系统采集两路信号峰值，并进行统计。测试结果

如图6所示，经高斯拟合后两通道峰值位置分别为 7110 和 7073 道，其相对偏差为 0.5%，半高宽分别为 46.61 和 37.56，计算得到信噪比分别为 51.11 dB、52.94 dB。

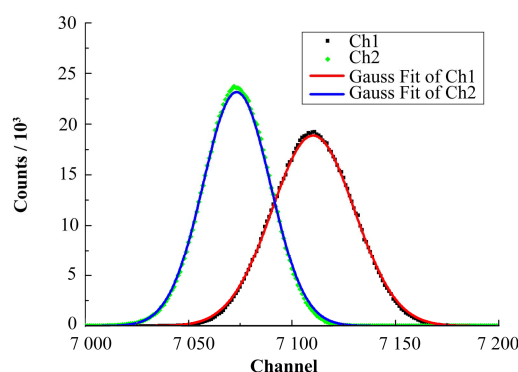


图6 固定输入下双通道输出幅度谱

Fig.6 Amplitude spectra of two channels with fixed input.

4.3 位置分辨测试

我们使用一台小型加速器中子源对系统进行了位置分辨率测试。测试时, 14 MeV 的中子束通过 100 mm 厚的聚乙烯慢化至热中子能区。He-3 探测器放置在两块包裹锡套的含硼聚乙烯及铅砖屏蔽体之后。两块屏蔽体之间留有约 1 mm 的缝隙。测量时缝隙距离 He-3 管的左端距离分别为 15 mm、35 mm、60 mm、90 mm、125 mm、160 mm、190 mm、215 mm 及 235 mm。测量结果如图 7 所示, 在探测器的有效长度内, 中子入射位置与测量结果具有较好的线性度。探测器中心的位置分辨达到了 3.5 mm, 由于电荷平衡等效应的影响, 两端的位置分辨慢慢变差, 其平均分辨为 6.1 mm, 能满足对应 BBS 谱仪最小 12.7 mm 增量的区域划分需求。

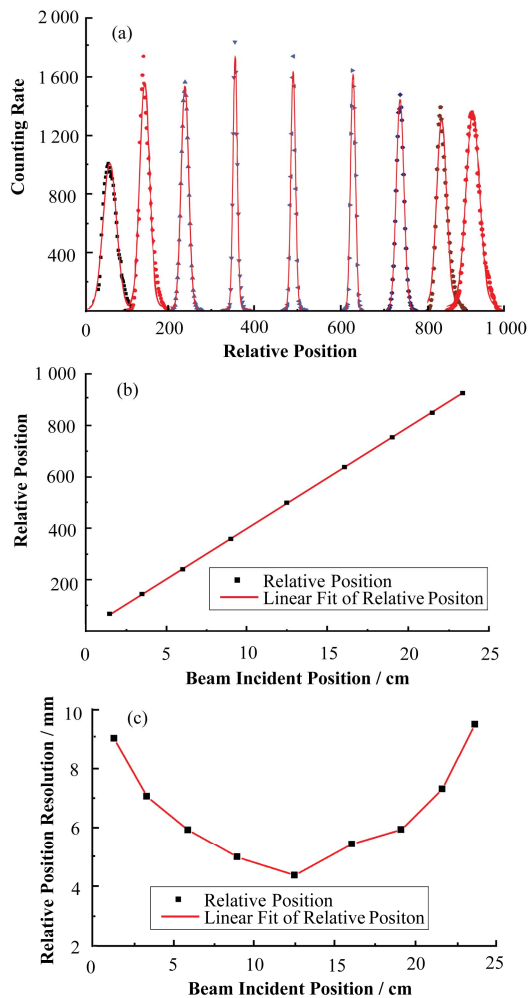


图 7 位置分辨测试结果 (a) 相对位置-计数分布图, (b) 中子入射位置与相对位置关系图, (c) 相对位置分辨示意图
Fig.7 Test result of position resolution. (a) Relative position and counter, (b) Incident position and relative position, (c) Incident position and position resolution

5 结语

本文设计了基于位置灵敏探测器的能谱型中子剂量率仪。通过优化电荷灵敏放大器及滤波成型电路的参数选择, 使系统具有较高的信噪比及较好的位置分辨。测试的结果表明电荷灵敏放大器具有超过 50 dB 的信噪比, 且不同通道间的一致性差异小于 0.5%。位置灵敏探测器的位置分辨具有较好的线性度, 平均分辨达到 6.1 mm, 满足了中子剂量计算中对慢化球空间分区最小 12.7 mm 增量的需求。而基于 FPGA 的数据获取系统可以达到 200 K 的最高计数率, 也满足了剂量率仪数据处理实时性的需求。

参考文献

- 1 Bramblett R L, Ewing R I, Bonner T W. A new type of neutron spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1960, **9**(1): 1–12
 - 2 Mares V, Schraube G, Schraube H, *et al.* Calculated neutron response of a Bonner sphere spectrometer with ^3He counter[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1991, **307**: 398–412
 - 3 Toyokawa H, Uritani A, Mori C, *et al.* Neutron spectrometer with position-sensitive proportional counters[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, **381**: 481–487
 - 4 Thomas D J, Alevra A V. Bonner sphere spectrometers-a critical review[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, **476**: 12–20
 - 5 黄土琛, 宫辉, 邵贝贝. 位置灵敏 ^3He 管中子探测器前端电子学设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, **52**(12): 1731–1735
- HUANG Tuchen, GONG Hui, SHAO Beibei. Design of the front-end electronics for linear position-sensitive ^3He neutron detector[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2012, **52**(12): 1731–1735

Design of the neutron dosimeter based on neutron sphere spectrometer

CHEN Lian LIANG Futian WANG Baochen JIN Ge

(State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Background: In neutron radiation protection applications, the spectrometric neutron dosimeter has almost isotropic response and can cover the energy from thermal to GeV neutrons, and the radiation field information such as neutron spectrum and neutron dose can be calculated more accurately. **Purpose:** A spectrometric neutron dosimeter which has high precision and high counting rate is developed. **Methods:** By optimizing the parameters of the readout circuit, the position resolution of the detector system is improved and the geometric division of the spherical moderator is more accurate. Using digital pulse processing technology, the dead-time of the system is reduced. **Results:** The position resolution of the neutron dosimeter has good linearity, and the average resolution is about 6 mm. The high counting rate of the data acquisition system is $200 \text{ k}\cdot\text{s}^{-1}$. **Conclusion:** We developed a neutron dosimeter based on neutron sphere spectrometer which has high position resolution and high counting rate. The performance of the dosimeter is expected to be improved for further optimization design after the test in the radiation field.

Key words Neutron dosimeter, Position-sensitive counter, Charge division, Digital pulse processing

CLC TL82